



Escuela Politécnica Superior

Departamento de Ingeniería Eléctrica

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**PARTICIPACIÓN DE LA GENERACIÓN  
SOLAR TERMOELÉCTRICA CON  
ALMACENAMIENTO EN EL MERCADO  
DIARIO DE ELECTRICIDAD**

**Autor:** Álvaro Peñalver Martín

**Tutor:** Julio Usaola García

**Titulación:** GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

**TÍTULO:** PARTICIPACIÓN DE LA GENERACIÓN SOLAR  
TERMOELÉCTRICA CON ALMACENAMIENTO EN EL MERCADO  
DIARIO DE ELECTRICIDAD

**AUTOR:** ÁLVARO PEÑALVER MARTÍN

**TUTOR:** JULIO USAOLA GARCÍA

**EL TRIBUNAL**

**PRESIDENTE:** - JAVIER SANZ FEITO

**SECRETARIO:** - SERGIO FUENTES DEL TORO

**VOCAL:** - MARCELO IZQUIERDO MILLAN

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Final de Grado el día 16 de octubre de 2017 en la Escuela Politécnica Superior de Leganés, de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la calificación de:

SECRETARIO

PRESIDENTE

VOCAL

## **RESUMEN**

En el presente en el que vivimos, la energía eléctrica es uno de los bienes más preciados de los que poseemos. La producción a partir de fuentes de energías renovables está creciendo cada día más y más, siendo la energía termosolar una de las principales alternativas para reducir la emisión de gases de efecto invernadero, cuyos niveles aumentan cada día.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es demostrar que las actuales centrales termosolares existentes pueden llegar a ser más rentables y, por consiguiente, estudiar nuevas inversiones en esta tecnología.

Durante las siguientes páginas podremos ver como optimizar la generación de potencia durante los días de todo un año, además de hallar el beneficio que podemos obtener aprovechando las horas de bajo precio para almacenar energía; y utilizar las horas de un precio mayor para inyectar potencia en la red. La optimización se realizará con un pequeño código del programa de cálculo Matlab.

Se explicarán cada uno de los elementos que existen en el proceso de cálculo del programa, sus valores y como se podría mejorar éste.

## **ABSTRACT**

Nowadays, electric energy is one of the most valuable goods we have. Its production from renewable energy sources is growing quickly, thermosolar being one of the alternatives to try to reduce the greenhouse effect which is increasing every day.

The aim of this bachelor thesis is to prove that the current thermosolar plants could become more profitable and therefore, promote investment in this technology.

Throughout the next pages, we will explore how to optimize electricity generation through the days of a year and how we can benefit most by using the low prices hours of the day to store the energy. During high price hours, we will use this energy store to inject electric power into the grid. The optimization function will be made in Matlab©.

The elements within the calculus process will be explained, along with their values and how we can improve them

# INDICE

RESUMEN.....	3
NOMENCLATURA.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1.    ORÍGENES DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO .....	10
1.2.    OBJETIVOS .....	11
1.3.    FASES DEL DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS .....	11
1.4.    APLICACIONES INFORMÁTICAS UTILIZADAS .....	13
<b>CAPÍTULO 2: GENERACIÓN, TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN EN EL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL.....</b>	<b>14</b>
2.1.    GENERACIÓN DE LA ENERGÍA.....	16
2.1.1.    ENERGÍA TÉRMICA DE CICLO COMBINADO.....	17
2.1.2.    ENERGÍA TÉRMICA PROCEDENTE DEL CARBÓN.....	20
2.1.3.    ENERGÍA TÉRMICA NUCLEAR.....	22
2.1.4.    FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES.....	24
2.1.4.1.    ENERGÍA EÓLICA.....	25
2.1.4.2.    ENERGÍA MARINA.....	28
2.1.4.3.    ENERGÍA HIDRAÚLICA .....	30
2.1.4.4.    ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	31
2.2.    EL TRANSPORTE Y LA DISTRIBUCIÓN DE LA ELECTRICIDAD .....	33
2.3.    COMERCIALIZACIÓN Y CONSUMO .....	35
<b>CAPÍTULO 3: LA ENERGÍA TERMOSOLAR .....</b>	<b>36</b>
3.1.    EL ORIGEN DE LA ENERGÍA TERMOSOLAR .....	36
3.2.    LA RADIACIÓN SOLAR.....	39
3.2.1.    ÁNGULOS SOLARES QUE AFECTAN A LA RADIACIÓN.....	40
3.2.2.    GEOMETRÍA DEL CAPTADOR.....	42
3.3.    LOS COMPONENTES DE LA CENTRAL TERMOSOLAR .....	43
3.3.1    EL CAMPO SOLAR.....	43
3.3.2.    EL BLOQUE DE POTENCIA .....	45
3.3.3.    ALMACENAMIENTO.....	46
3.4.    TECNOLOGÍAS .....	47
3.4.1.    CENTRAL CON CAPTADORES CILINDRO PARABÓLICOS (CCP).....	47
3.4.2.    CENTRALES DE RECEPTOR CENTRAL O DE TORRE (RC).....	49
3.4.3.    CENTRALES DE CONCENTRADORES LINEALES FRESNEL (CLF) .....	50
3.4.4.    CENTRALES DE DISCOS PARABÓLICOS (DCP).....	51
<b>CAPÍTULO 4: MERCADO ELÉCTRICO .....</b>	<b>53</b>
4.1.    ORIGEN Y ACTIVIDADES DEL MERCADO ESPAÑOL.....	53
4.2.    MERCADO MAYORISTA.....	55
4.3.    MERCADO MINORISTA .....	57
4.4.    REGULACIÓN .....	58

<b>CAPÍTULO 5: MODELO DE OPTIMIZACIÓN.....</b>	<b>60</b>
5.1. ECUACIONES DE LA PRIMERA APROXIMACIÓN .....	61
5.2. FUNCIÓN DE OPTIMIZACIÓN .....	64
5.3. VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS.....	65
<b>CAPÍTULO 6: RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
6.1. CASO SIN ALMACENAMIENTO.....	67
6.1.1. PERIODO DE INVIERNO .....	67
6.1.2. PERIODO DE VERANO .....	68
6.1.3. BENEFICIO ACUMULADO.....	69
6.2. CASO CON ALMACENAMIENTO.....	70
6.2.1. PERIODO DE INVIERNO .....	70
6.2.2. PERIODO DE VERANO .....	71
6.2.3. BENEFICIO ACUMULADO.....	72
6.3. COSTES DE INVERSIÓN .....	73
6.4. RENTABILIDAD.....	74
<b>CAPÍTULO 7: MEJORAS A IMPLEMENTAR .....</b>	<b>77</b>
7.1. ECUACIONES INCLUYENDO LA MEJORA .....	78
7.2. EXPLICACIÓN DE LA MEJORA DEL MODELO .....	80
7.3. MODELO PREDICTIVO .....	81
<b>CAPÍTULO 8: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....</b>	<b>82</b>
<b>CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>86</b>
CODIGO DE PROGRAMACIÓN DE LA APLICACIÓN REALIZADA EN MATLAB .....	86
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>96</b>

# NOMENCLATURA

Símbolo	Definición		
$\pi_{DM} (j)$	Precio de la energía de cada hora en el Mercado Diario (€/MWh)	$P_{grid} (j)$	Potencia de Autoconsumo tomada de la Red (MWe)
$E_A (j)$	Energía Almacenada (MWth)	$P_T (j)$	Potencia de Salida ( MWe)
$E_A^{max}$	Energía de Almacenamiento máxima (MWth)	$P_T^{max}$	Potencia de Salida máxima de la planta (MWe)
$E_A^{min}$	Energía de Almacenamiento mínima (MWth)	$P_T^{min}$	Potencia de Salida mínima de la planta (MWe)
$E_{warm}$	Energía necesaria para calentar el Campo solar (MWth)	$P_{self}$	Potencia de autoconsumo de la planta. (MWe)
$j$	Intervalo de Tiempo (Horas)	$P_{Solar} (j)$	Potencia Solar incidente (MWt)
$J$	Horas Totales en el caso de estudio. (Horas)	$P_{spill} (j)$	Potencia desechada (MWt)
$\eta^+$	Rendimiento de Almacenamiento de la Energía	$E_A^{min}$	Energía de Almacenamiento mínima (MWth)
$\eta_{sto}$	Rendimiento de aporte de Energía desde el Almacenamiento	$P_{startup} (j)$	Potencia de arranque de la planta (MWt)
$\eta_o$	Rendimiento del Bloque de Potencia para la Potencia de salida	$P_{startup}^{sp}$	Valor de Potencia requerida para el arranque de la planta (MWe)
$P_A^+ (j)$	Potencia suministrada desde el almacenamiento (MWt)	$v (j)$	Variable binaria de Funcionamiento de la planta
$P_A^- (j)$	Potencia Almacenada desde el bloque de potencia (MWt)	$y (j)$	Variable binaria indicadora del arranque de la planta.
$\Delta P_A^{loss} (j)$	Variación de potencia en el almacenamiento. Pérdidas (MWe)		

# ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.- Representación de la “Red” del sistema eléctrico. [11]  
Figura 2.- Esquema desde la generación hasta el cliente. [9]  
Figura 3.- Imagen representativa de los caminos de la energía. [10]  
Figura 4.- Cobertura de la demanda eléctrica en la península por las diferentes tecnologías de generación. [20]  
Figura 5.- Representación de una central de ciclo combinado. [16]  
Figura 6.- Ciclo termodinámico de Rankine y diagrama de estados del mismo. [17]  
Figura 7.- Diagrama de estado del ciclo Brayton. [18]  
Figura 8.- Representación del ciclo combinado, uniendo el ciclo de gas Brayton y el ciclo de vapor Rankine. [19]  
Figura 9.- Representación de una central térmica de carbón. [21]  
Figura 10.- Elementos de una central térmica de carbón. [22]  
Figura 11.- Representación de una central nuclear. [23]  
Figura 12.- Gráfico de la potencia total instalada en España. Fuente Red Eléctrica de España. [27]  
Figura 13.- Vista de los elementos de un aerogenerador. [28]  
Figura 14.- Tipos de Aerogeneradores de eje vertical. [29]  
Figura 15.- Parque eólico offshore en Norfolk. [30]  
Figura 16.- Representación de una presa preparada para la tecnología mareomotriz. [31]  
Figura 17.- Dispositivos con partes móviles de tecnología undimotriz. [32]  
Figura 18.- Representación de generadores subacuáticos. [33]  
Figura 19.- Representación de una central hidroeléctrica. [36]  
Figura 20.- Demanda Eléctrica de un día. REE. [34]  
Figura 21.- Producción Hidráulica de un día. REE. [34]  
Figura 22.- Comparativa de los diferentes tipos de turbinas hidroeléctricas. [35]  
Figura 23.- Representación de una central solar fotovoltaica. [37]  
Figura 24.- Diferentes tipos de apoyos según la tensión. [39]  
Figura 25.- Diagrama de un cable subterráneo [40]  
Figura 26.- Reproducción moderna de una Skaphia griega. [41]  
Figura 27.- Grabado de la Antigüedad. [41]  
Figura 28.- Máquina de Vapor de Mouchot. [42]  
Figura 29.- Primer receptor solar de Mouchot. [43]  
Figura 30.- Dibujo de la radiación solar proyectada sobre un colector solar. [49]  
Figura 31.- Movimiento de traslación de la tierra. [44]  
Figura 32.- Declinación solar. [45]  
Figura 33.- Movimiento del Sol durante el día. [46]  
Figura 34.- Incidencia del sol en diferentes días. [47]  
Figura 35.- Explicación de los diferentes ángulos en una placa. [48]  
Figura 36.- Dibujo explicativo de las sombras. [50]  
Figura 37.- Dibujo explicativo de los bloqueos. [50]

- Figura 38.- Planta en Chile de Acciona. [52]
- Figura 39.- Campo solar de la planta solar PS20 en Sevilla. [53]
- Figura 40.- Diferentes Tipos de Tecnologías. [51]
- Figura 41.- Diagrama de una central termosolar CCP. [37]
- Figura 42.- Tabla de rendimientos y de índice de concentración de las diferentes tecnologías termosolares. [58]
- Figura 43.- Incidencia del Sol en los colectores de una central CCP. [37]
- Figura 44.- Ejemplo de un seguidor solar de este a oeste. [55]
- Figura 45.- Dibujo de una central termosolar de torre. [55]
- Figura 46.- Planta de Torresol Energy en Sevilla. [56]
- Figura 47.- Colectores y receptor de una central de concentradores lineales Fresnel. [57]
- Figura 48.- Discos parabólicos. [57]
- Figura 49.- Mapa de España con las empresas distribuidoras. [4]
- Figura 50.- Centro de control de Red Eléctrica de España. [7]
- Figura 51.- Compra y venta de energía a través del tiempo para el día D. [2]
- Figura 52.- Casaciones por hora de las curvas de oferta y de demanda. [3]
- Figura 53.- Curvas de compra y venta de la energía. [8]
- Figura 54.- Gráfica de tres días típicos de invierno. [Fuente MatLab]
- Figura 55.- Gráfica de tres días típicos de verano. [Fuente MatLab]
- Figura 56.- Beneficio Acumulado en un año sin almacenamiento. [Fuente MatLab]
- Figura 57.- Gráfica de tres días típicos de invierno con almacenamiento. [Fuente MatLab]
- Figura 58.- Gráfica de tres días típicos de verano con almacenamiento. [Fuente MatLab]
- Figura 59.- Beneficio Acumulado en un año con almacenamiento. [Fuente MatLab]



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Mínimos y Máximos de las Variables. [Elaboración Propia]

Tabla 2.- Coste de inversión de diferentes tecnologías. Fuente IDAE [60]

Tabla 3.- Análisis Económico de una central CCP con y sin almacenamiento.  
[Elaboración propia]

Tabla 4.- Tareas realizadas en la elaboración de la memoria. [Elaboración propia]

Tabla 5.- Diagrama de Gantt con la duración del Trabajo de Fin de Grado.  
[Elaboración propia]

# CAPÍTULO 1:

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. ORÍGENES DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

La electricidad es una necesidad que, a medida que pasa el tiempo, aumenta. Cada año que transcurre, la demanda energética aumenta y la amenaza de la desaparición de las limitadas reservas de los combustibles fósiles hace que se busquen alternativas en otros tipos de energía.

En el pasado se han llevado a cabo encuentros, convenciones y reuniones en los que se han firmado importantes protocolos y tratados de medioambiente, tales como La Cumbre de Estocolmo en 1972 o el Protocolo de Kioto en la década de los años 90. Esto supuso un punto de inflexión para los gobiernos y la apertura del camino de las energías renovables.

España es un territorio que dispone de un recurso solar aceptable, y por tanto es un lugar donde se han realizado inversiones en varias centrales de generación de dicha energía.

En este Trabajo de Fin de Grado se pretende optimizar esta tecnología de generación renovable para mejorar su rentabilidad en los siguientes años. El almacenamiento es la clave, ya que se ofrece la posibilidad de recoger la energía captada excedente durante las horas de producción solar y utilizarla en los periodos de ausencia de radiación solar, lo que nos da la oportunidad de utilizar la central un mayor número de horas.

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo consiste, de manera simplificada, en implementar un código en el software MatLab para analizar cuándo es más conveniente generar energía, y cuando almacenarla.

Para plantear el objetivo principal de este proyecto han sido necesarias las siguientes partes:

- Búsqueda y estudio de información básica sobre las tecnologías de producción eléctrica renovables, haciendo hincapié en la tecnología termosolar, explicando la relación con el recurso solar y su tecnología de funcionamiento y almacenamiento.
- Elección de la ubicación y de la central que es objeto de análisis en este proyecto. En este caso la ubicación elegida, que dispone de un gran recurso solar, es la provincia española de Sevilla.
- Obtención de los parámetros necesarios de la central y datos reales de potencia solar incidente, potencia real generada y precio del mercado diario durante el año 2014.
- Generación de código con la aplicación MatLab para realizar la optimización a través de la función *Linprog*.
- Obtención de los resultados más relevantes del punto anterior y análisis de los mismos.
- Comparación con los resultados sin optimización
- Análisis económico de los resultados obtenidos y conclusión de la mejora que se propone.
- Mejora del programa de optimización.

## 1.3. FASES DEL DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS

Las siguientes fases, expuestas a continuación, son las que se han seguido para conseguir los objetivos de este proyecto:

- Documentación: El primer contacto con el tema a seguir fue con el artículo '*Operation of concentrating solar power plants with storage in spot electricity markets*' [44] para obtener, de manera general, un entendimiento global de las centrales tipo "CSP" (Concentrating solar power). A partir de este artículo se amplía el rango de búsqueda.
- Planteamiento del problema y búsqueda de información adicional.
- Obtención de resultados del programa y comparación entre ellos.
- Estudio de alternativas y mejoras.
- Redacción de la memoria. La estructura de la memoria es la siguiente:
  - Capítulo 1: Pequeño desarrollo inicial de los temas que se van a tratar en este Trabajo de Fin de Grado.

- Capítulo 2: Descripción del sistema eléctrico español: Generación, Transporte y Distribución de la energía. Descripción de las tecnologías típicas de generación.
- Capítulo 3: Análisis de la energía termosolar: orígenes, explicación de la radiación solar, descripción de los componentes y enumeración de los diferentes tipos de tecnología.
- Capítulo 4: Reseña al mercado eléctrico español, con una breve explicación de los diferentes apartados.
- Capítulo 5: Desarrollo del modelo de optimización que se va a utilizar, explicando las ecuaciones y las variables.
- Capítulo 6: Presentación de los resultados obtenidos y comparativa de los diferentes casos del estudio.
- Capítulo 7: Elaboración de las posibles mejoras que se pueden llevar a cabo en el modelo utilizado
- Capítulo 8: Planteamiento de las conclusiones de la memoria. Críticas a los resultados.
- Capítulo 9: Descripción del tiempo utilizados para cada una de las partes de la memoria, integrado en un breve cronograma.
- Anexos: Código de programación de la aplicación MatLab©
- Bibliografía: Reseña de las referencias bibliográficas utilizadas.

## **1.4. APLICACIONES INFORMÁTICAS UTILIZADAS**

Las herramientas que se han utilizado para la elaboración del Trabajo de Fin de Grado son las siguientes:

- Paquete de Microsoft Office:
  - Microsoft Word para la redacción de la memoria
  - Microsoft Excel para el cálculo de tablas y análisis económico.
  - Microsoft Project para el diseño del diagrama de Gantt
  - Microsoft PowerPoint para la creación de la presentación para la defensa de la memoria.
- Software de cálculo matricial MatLab© (R2016b), para la programación del modelo de optimización de la central.
- SAM© (System Advisor Model) de NREL (National Renewable Energy Laboratory), para la obtención de datos utilizados en el modelo de optimización.
- Navegadores de internet Google Chrome© e Internet Explorer© para la búsqueda de información.

# **CAPÍTULO 2**

## **GENERACIÓN, TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN EN EL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL.**

El sistema eléctrico español, como cualquier otro en el mundo, consta de un conjunto de elementos que operan de forma coordinada en todo el territorio español que sirven para satisfacer la demanda de energía eléctrica en cualquier punto. Dentro de dicho sistema existen las actividades de la generación, el transporte y la distribución de la electricidad.

Prácticamente todos los sistemas eléctricos tienen las mismas características: son sistemas trifásicos, disponen de medidas de control y los parámetros principales son la tensión y la frecuencia.

Estos sistemas tienden al equilibrio constantemente entre el consumo y la producción de electricidad, ya que no es posible almacenar grandes cantidades de energía. Por ello se dice que son sistemas dinámicos.

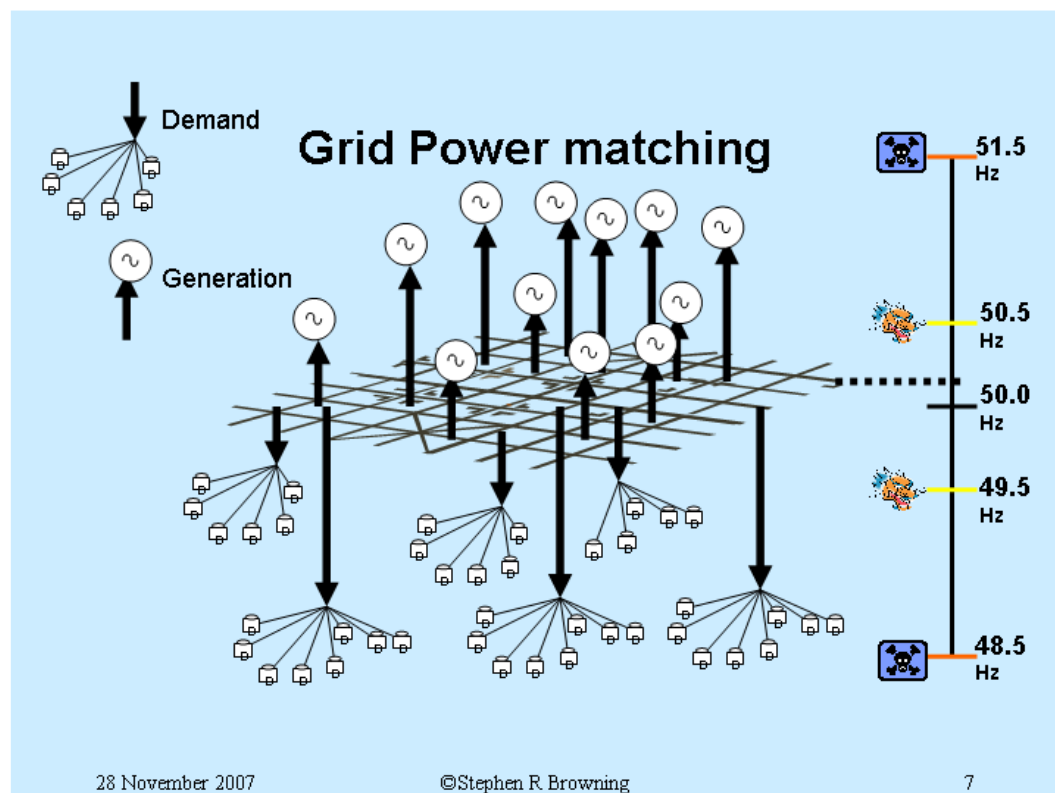


Figura 1. Representación de la “Red” del sistema eléctrico [11]

El proceso que se sigue es el siguiente. Las centrales de generación vierten su producción eléctrica a *la malla* del sistema con la frecuencia del mismo. Cuando se encuentra en la red, se eleva la tensión para poder transportarla hacia los centros de transformación y distribución. Completado este trayecto se realiza la operación inversa y se reduce la tensión para hacer frente a la demanda de energía. Todo este proceso está controlado por el organismo CECOEL (Centro de Control Eléctrico), para que cumpla las tres máximas de cualquier sistema: continuidad, calidad y fiabilidad de suministro.

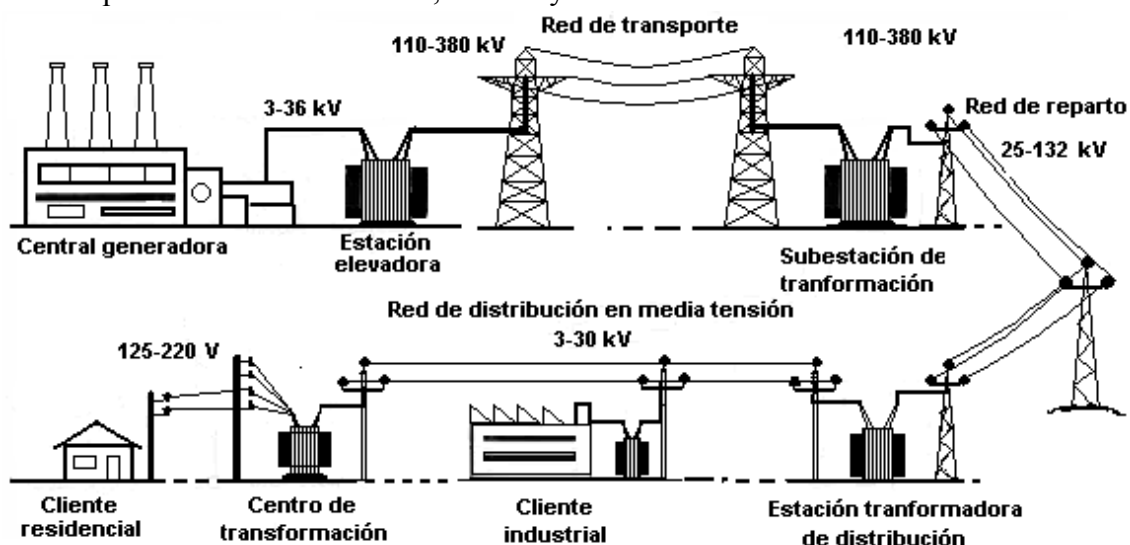


Figura 2. Esquema desde la generación hasta el cliente [9]

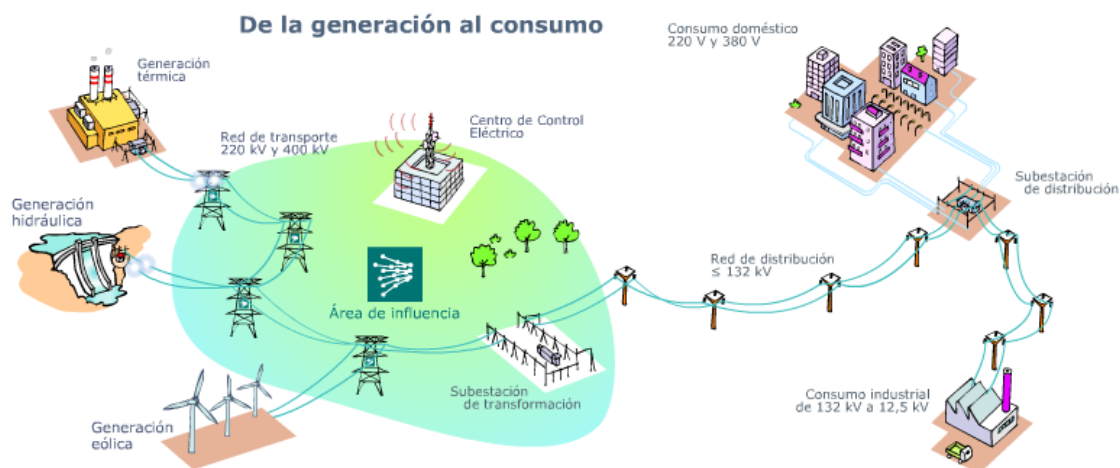


Figura 3. Imagen representativa de los caminos de la energía.  
[10]

A continuación, se explica cada una de las actividades que conforman el sistema eléctrico.

## 2.1. GENERACIÓN DE LA ENERGÍA

La generación eléctrica es la conversión de energías denominadas primarias de distintos orígenes, combustibles fósiles, el mar, los ríos, el viento, el sol o la fusión nuclear, en energía eléctrica. Este proceso tiene lugar en las centrales de producción que pueden ser de diversos tipos, dependiendo del tipo de recurso que estemos tratando.

La actividad de la generación está liberalizada y por tanto los agentes generadores compiten entre sí en los mercados. Como dato añadido decir que la producción de energía se inyecta en la red a tensiones entre 6 y 20 kV.

En 2016 en España la producción de energía eléctrica se dividió en los siguientes porcentajes:

Cobertura de la demanda peninsular



Figura 4. Cobertura de la demanda eléctrica en la península por las diferentes tecnologías de generación.

[20]



A continuación, se explicarán las diferentes tecnologías presentes en el sistema eléctrico español.

### 2.1.1. ENERGÍA TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

A día de hoy en España, las plantas de ciclo combinado producen la mayor parte de la energía térmica convencional. Son centrales en las que se transforma la energía térmica del gas natural en electricidad mediante dos ciclos consecutivos: una turbina de gas, utilizada dentro de un ciclo Brayton y una turbina de vapor, que pertenece a un ciclo Rankine.

Las centrales de ciclo combinado se basan en cómo se utiliza el calor generado en el ciclo de vapor y de gas. El calor que genera el elemento combustible es aprovechado para elevar la temperatura del fluido de los ciclos y mover las turbinas de gas y vapor. Ambas turbinas están acopladas a un elemento transformador, el alternador, que convierte la energía producida por el movimiento de las turbinas en energía eléctrica.

La combinación de estos dos procesos permite alcanzar rendimientos, en torno al 60%, muy superiores a los de una central térmica convencional con un solo ciclo, ya que obtiene la energía eléctrica en dos etapas, logrando así existe un mayor aprovechamiento de la energía del combustible.



Figura 5. Representación de una central de ciclo combinado  
[16]

A continuación, se explica en funcionamiento de ambos ciclos.

El ciclo de vapor o ciclo Rankine consta de cuatro componentes en su expresión más simplificada. Normalmente suele existir procesos más complejos para aumentar el rendimiento del ciclo, como las regeneraciones, los precalentamientos y/o los recalentamientos.

Los elementos básicos de dicho ciclo son:

- Bomba: es el elemento que eleva la presión del fluido para poder ser trasladado por todo el circuito. La bomba consume parte de la energía eléctrica producida por la turbina, y en el caso de arranque del ciclo, de la red. Elemento 1-2 en la Figura 6.
- Foco de emisión de calor: constituido normalmente por una caldera, funciona como intercambiador de calor del combustible utilizado. Su función es aumentar la temperatura del fluido del circuito hasta que se convierta en vapor saturado. Elemento 2-3 en la Figura 6.
- Turbina: Cuando el fluido alcanza el estado de vapor saturado dentro de la caldera, estando a una temperatura y presión elevada, entra en los álabes de la turbina, produciendo el movimiento necesario para generar energía eléctrica a través del alternador. Durante este proceso se reduce la presión y temperatura del fluido. Elemento 3-4 en la Figura 6.
- Condensador: este elemento se encarga de enfriar el fluido hasta alcanzar su estado inicial en un proceso a presión constante. Con el fluido en estado de líquido saturado comienza otra vez el ciclo. Elemento 4-1 en la Figura 6.

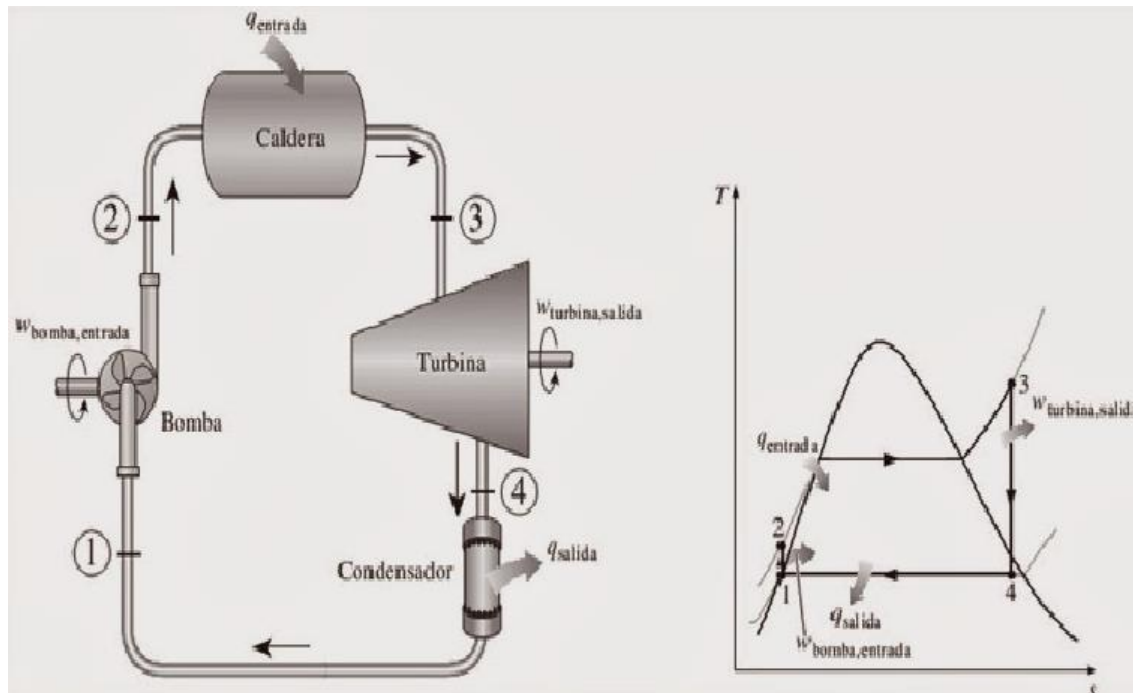


Figura 6. Ciclo termodinámico de Rankine y diagrama de estados del mismo [17]

El ciclo de gas o ciclo Brayton, cuyo combustible es habitualmente el gas natural, es similar al ciclo Rankine con algunas variaciones. El fluido utilizado es el aire proveniente de la atmósfera en vez del agua. El elemento que en el ciclo de vapor es una bomba, en este ciclo es un compresor, utilizado para elevar la presión del aire. El resto de los elementos son muy parecidos.

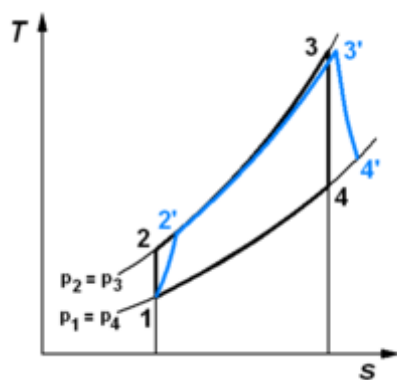


Figura 7. Diagrama de estado del ciclo Brayton [18]

Cuando utilizamos ambos ciclos en la central de ciclo combinado, los elementos se solapan para poder optimizar la energía del combustible. Como ya se ha comentado anteriormente el combustible es gas natural, que se usa en el quemador del ciclo de gas. Cuando el aire saturado sale de la turbina del ciclo Brayton entra en un intercambiador de calor que hace las veces de caldera para el segundo ciclo, el ciclo de vapor, el cual, utilizando el calor producido en el anterior proceso, calienta el fluido hasta convertirlo en vapor saturado y así hacer funcionar la turbina del ciclo Rankine.

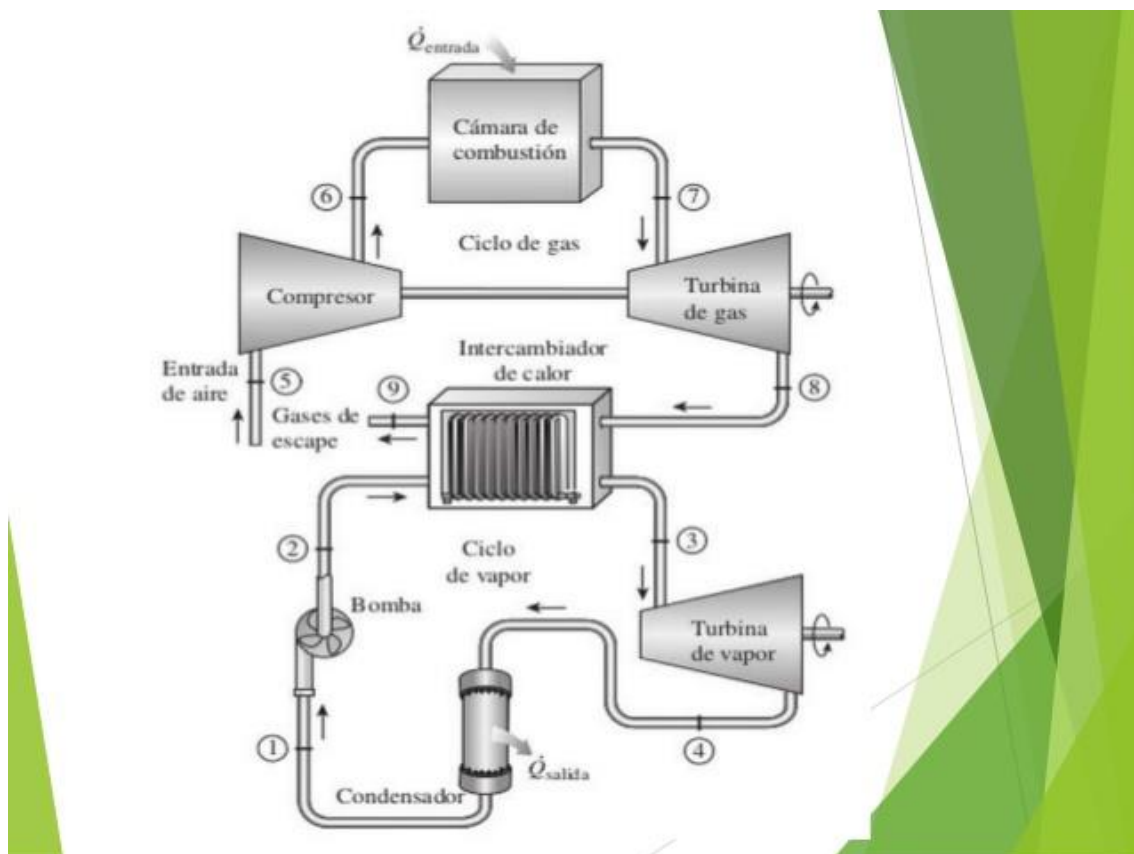


Figura 8. Representación del ciclo combinado, uniendo el ciclo de gas Brayton y el ciclo de vapor Rankine.

[19]

Los ciclos combinados de gas natural tienen mayor rendimiento que el resto de las centrales térmicas, ya que aportan potencia de dos circuitos, el de la turbina de gas y el de la turbina de vapor. Además, este tipo de central es muy flexible y fiable en comparación con las demás.

En el año 2016 la generación en España con esta tecnología fue de un 10,4% del total.

### 2.1.2. ENERGÍA TÉRMICA PROCEDENTE DEL CARBÓN

Hasta hace unos años, las centrales térmicas convencionales de carbón cargaban con un peso importante en la generación. A día de hoy este tipo de central se ha reducido hasta ocupar un 13,7% de la producción. Esta reducción se debe a los objetivos medioambientales y a la mayor producción de las centrales de energías renovables.

Este tipo de centrales utiliza el ciclo de vapor. Producen calor mediante la combustión de un tipo de combustible, en este caso carbón, y con este calor se aumenta la temperatura del fluido, agua en este caso, que realiza el recorrido del ciclo Rankine explicado en el apartado anterior.

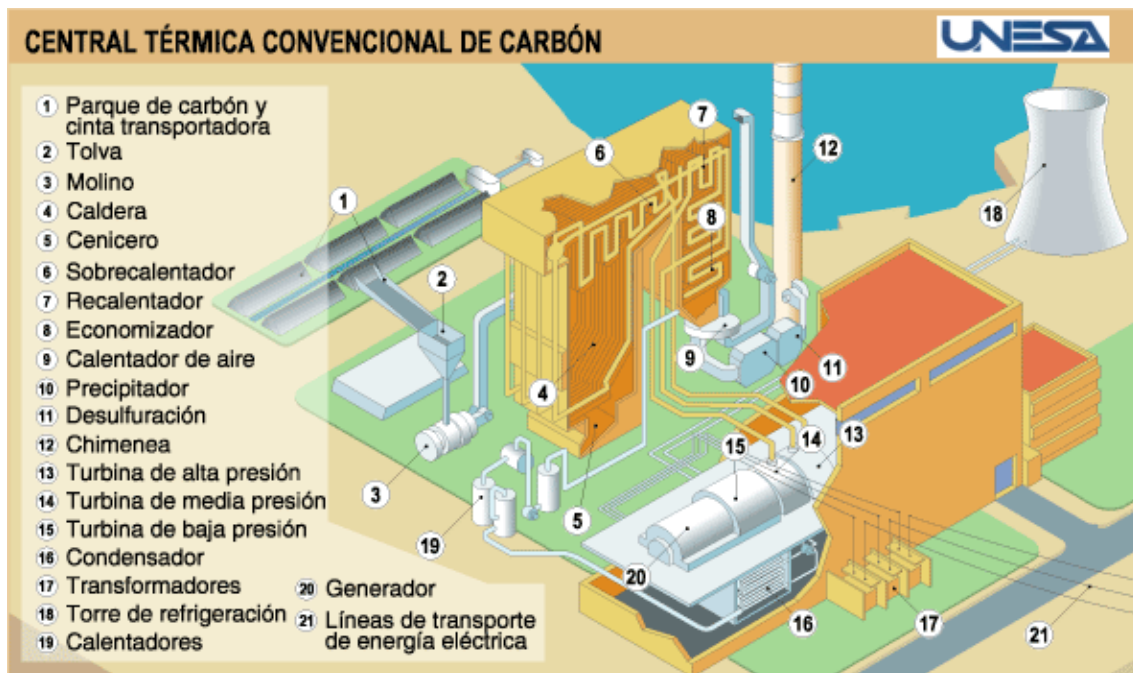


Figura 9. Representación de una central térmica de carbón  
[21]

Las características que definen el tipo de central están en la particularidad de cómo conseguir dicho calor. En las centrales de carbón se conoce como el “circuito de aire, combustible, gases y cenizas”. En la figura 10 a continuación se detallan los elementos que lo conforman.

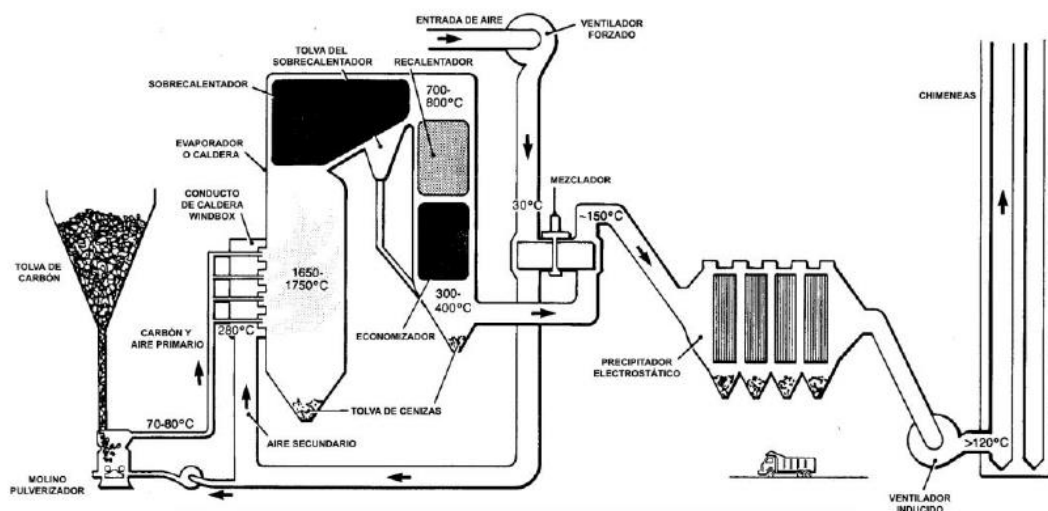


Figura 10. Elementos de una central térmica de carbón.  
[22]

La tolva de alimentación contiene el carbón en su fase inicial cuyo movimiento se realiza gracias a un molino pulverizador. Más adelante, el carbón se introduce en el generador de vapor o caldera y se volatiliza la mezcla de aire y combustible calentando a su vez

diversos compartimentos como son: el economizador, el calderín, los sobrecalentadores y el recalentador. La solución resultante de la combustión, con cenizas suspendidas, sale de la caldera y tras pasar por un mezclador, donde parte de ella vuelve a la caldera, va a parar a un precipitador electrostático que captará las cenizas y las almacenará para su posterior exportación. A la salida del precipitador, se encuentra otro ventilador que expulsará los gases contaminantes a través de una o varias chimeneas.

La ventaja más señalada de esta tecnología es que presenta una alta fiabilidad y disponibilidad a la respuesta de la demanda eléctrica. Por contraste, sus desventajas serían, en el ámbito local, el ensuciamiento por culpa del polvo creado y, globalmente, una contribución mayor al efecto invernadero por los gases emitidos.

### **2.1.3. ENERGÍA TÉRMICA NUCLEAR**

Actualmente en España se encuentran en funcionamiento 6 centrales nucleares, todas ellas en la península, 2 de las cuales disponen de 2 reactores cada una (Almaraz y Ascó), por lo que suman 8 reactores, con una potencia total instalada de 7.728 MW.

Las centrales térmicas nucleares aprovechan el calor obtenido en el proceso de fisión de átomos radiactivos para producir energía. Los elementos más comúnmente utilizados son el uranio y el plutonio, que ya tienen las características ideales para éste proceso.

El proceso de la fisión nuclear se define como la ruptura de los núcleos del átomo en varias partes, creando una reacción exotérmica que permite utilizar este calor para generar energía. La ruptura se realiza por varios métodos, uno de ellos sería lanzar un neutrón libre contra el átomo de uranio haciéndolo inestable, obteniéndose así la ruptura. Para tener controladas las reacciones en cadena se realizan en un reactor, una instalación que permite formar este tipo de reacciones sin peligro de escape o fuga.



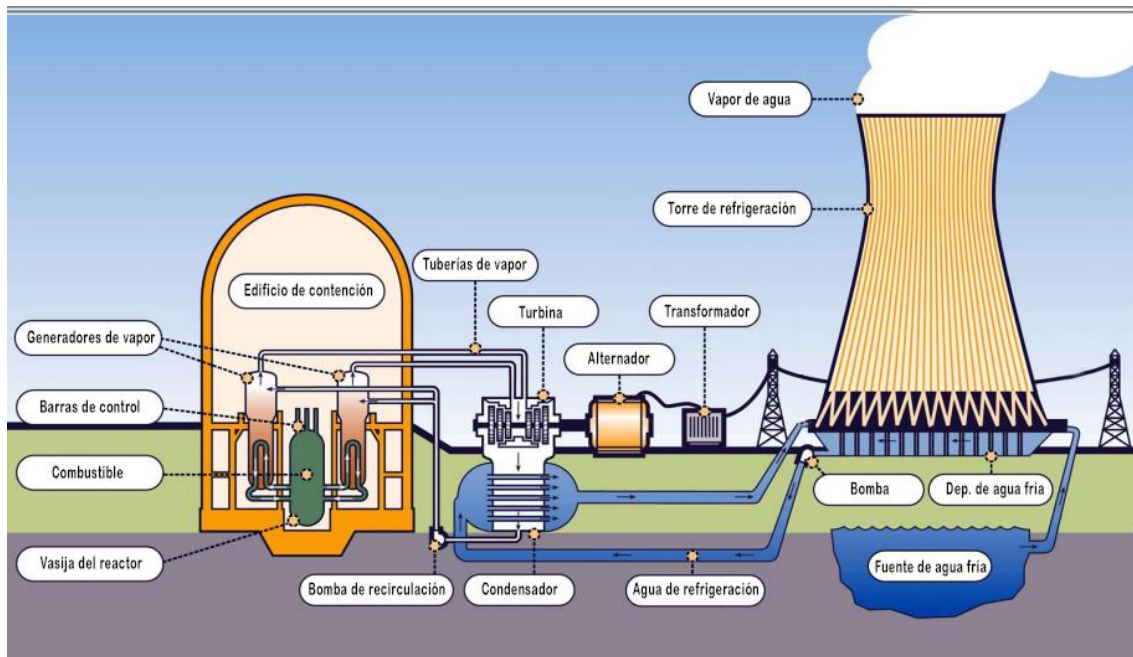


Figura 11. Representación de una central nuclear.  
[23]

El aprovechamiento del calor funciona como en todas las centrales térmicas, a través de un ciclo Rankine. El calor producido en el reactor sirve para convertir el fluido, en este caso vuelve a ser agua, en vapor a alta presión. Dicho vapor rota una o varias turbinas que a través del alternador producen potencia eléctrica.

Los diferentes elementos que componen la central son:

- Vasija del reactor: Recubrimiento de acero en que se aloja el reactor nuclear. Es el componente principal de la central, ya que es donde se produce la fisión.
- Generador de vapor: Es, simplificando su funcionamiento, un intercambiador de calor para producir vapor de agua.
- Edificio de contención: Construcción que alberga todo el sistema de refrigeración del reactor y algunos sistemas auxiliares de la central.
- Turbina y Alternador: Es el equipo que produce energía eléctrica dentro del ciclo de vapor.
- Transformador: Aumenta la tensión para inyectar la potencia generada en la red.
- Torre de refrigeración: Instalación que actúa como foco frío. Cede a la atmósfera una parte del calor residual producido en la generación.
- Condensador: Es el mismo elemento que en el ciclo de vapor de las centrales térmicas de carbón y de ciclo combinado.

Existen diferentes tecnologías atendiendo a la clase de reactor, éstos son: PWR (Pressurized Water Reactor), BWR (Boiling Water Reactor), GCR (Gas Cooled Reactor), HWR (Heavy Water Reactor). Cada uno de ellos con diferentes tipos de refrigerante, moderador y combustible.

Este tipo de centrales tienen una gran serie de ventajas: no producen gases contaminantes, se necesita un menor combustible para generar grandes cantidades de energía, y por último la producción de energía es casi ininterrumpida ya que se usa casi un 90% de horas al año.

A pesar de ello tiene serios inconvenientes, ya que el recurso nuclear puede llegar a constituir un peligro debido a su carácter inestable sin las atenciones necesarias. Los residuos que genera deben ser tratados en instalaciones especializadas y tardan años en dejar de ser peligrosos para la vida humana. Además la vida útil de una central viene dada por su reactor, y por tanto tiene un coste de inversión mayor.

#### **2.1.4. FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES**

El sol es un elemento que nos proporciona una de las fuentes de energía más relevantes que podemos tener en nuestro planeta, la energía solar. Las dos variantes que hemos podido aprovechar más eficientemente son la energía solar fotovoltaica y la energía termosolar. Pero podemos ir más lejos afirmando que el sol es la causa de otras energías que utilizamos, como podría ser la energía eólica, donde provoca variaciones de temperatura en nuestra troposfera y se produce el efecto del viento. Incluso, mucho tiempo atrás, el carbón, el petróleo o el gas fueron creados por la acción del sol, ya que las altas temperaturas hicieron efecto en la naturaleza para formar dichos combustibles fósiles.

En España el 39,7% de la demanda anual de energía eléctrica se cubre a partir de fuentes renovables, como el viento, el agua o el sol.

A continuación, se presenta los diferentes tipos de recursos renovables con más presencia actual en el mercado.



#### 2.1.4.1. ENERGÍA EÓLICA

Cuando la radiación solar llega a la superficie terrestre, ha tenido que pasar por las diferentes capas de la atmósfera, y esto ha producido una variación de temperatura que provoca el movimiento de aire necesario para producir energía eléctrica a través de los aerogeneradores. Se calcula que menos del 1% de la energía solar que llega a la superficie terrestre se transforma en energía eólica, siguiendo el proceso que se ha explicado [25]. Pero a pesar de ser tan pequeño el porcentaje convertido sería suficiente para generar la cantidad de energía necesaria para abastecer la demanda de todo el planeta.

En el año 2016 la potencia eólica instalada supuso el 21% de la total en España. [26] Con 23.000 GW instalados en el territorio español, España se convierte en uno de los países en cabeza del desarrollo de la energía eólica.

Se muestra una gráfica con las potencias instaladas a finales del año 2016.

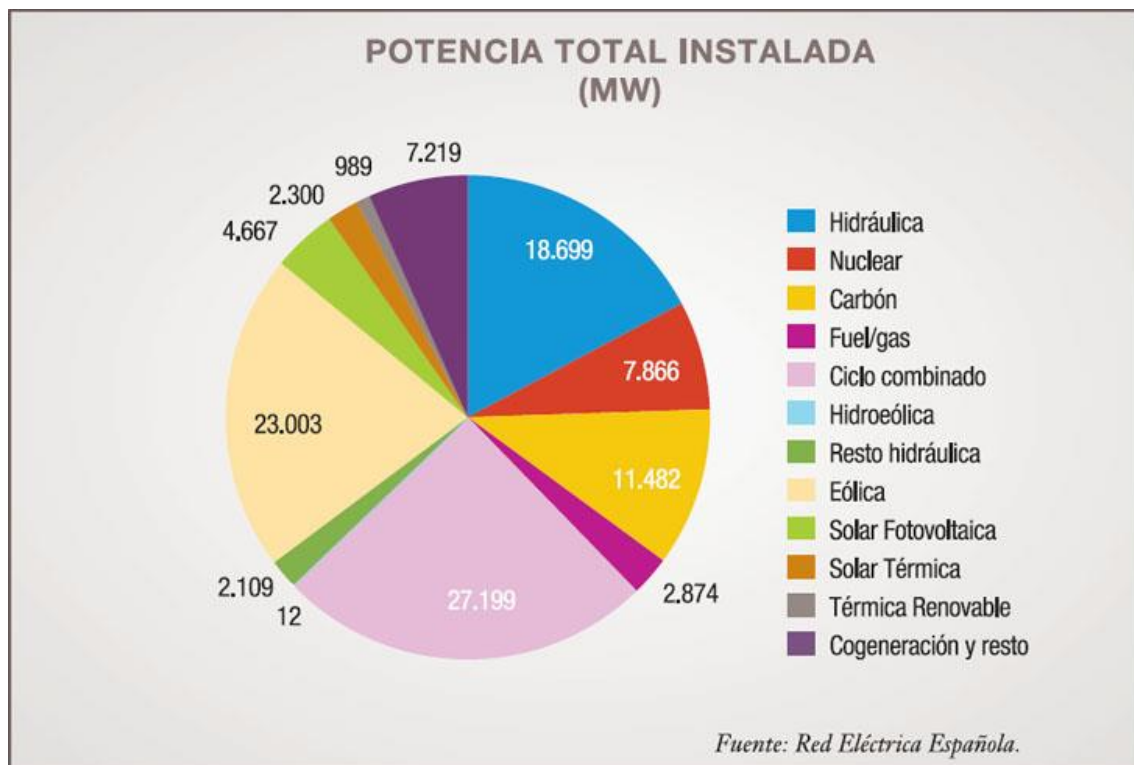


Figura 12. Gráfico de la potencia total instalada en España. Fuente Red Eléctrica de España [27]

La transformación de la energía procedente del viento a energía eléctrica se lleva a cabo mediante turbinas de viento o aerogeneradores. Estos *molinos de viento* llevan incorporados un alternador, que es el encargado de convertir el movimiento producido en electricidad.

El proceso comienza con el viento haciendo girar las palas, que crea un movimiento en el eje de baja velocidad. Mediante una caja de cambios se modifica la velocidad para obtener un mayor aprovechamiento del movimiento en el generador, que transforma dicho movimiento en energía eléctrica

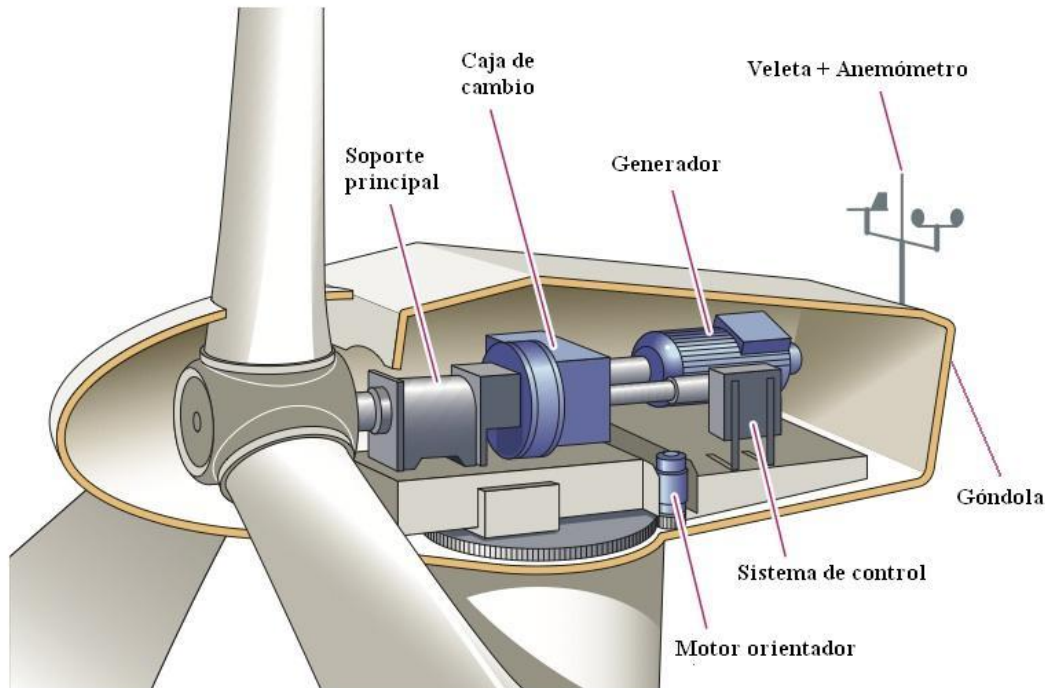


Figura 13. Vista de los elementos de un aerogenerador.  
[28]

A mayor altura, mayor recurso eólico vamos a tener, por ello los aerogeneradores tienen una altura considerable. Por este motivo es necesario que la velocidad del viento esté entre un valor mínimo (cut in speed) para que no comience a funcionar hasta tener un recurso suficiente para producir energía, y entre un valor máximo (cut out speed) para que se detenga cuando supera dicho valor. Este último límite de funcionamiento viene dado por motivos de seguridad, además de para evitar roturas y desgastes excesivos en la maquinaria.

Para que el aprovechamiento del viento sea máximo, los aerogeneradores vienen dotados de sistemas de control y sensores como anemómetros o veletas para que se pueda hacer un seguimiento más efectivo de la dirección del viento, y así aumentar la potencia generada.

Asimismo, hay que explicar que existen diferentes tipos de aerogeneradores con diferentes rendimientos y formas que se han ido probando a lo largo de los años. Quizás los más conocidos sean los generadores de eje horizontal de tres palas, Figura 13, aunque existen también de un número diferente. La otra variante son los de eje vertical, que tienen un rendimiento menor, pero son capaces de aprovechar mejor el viento sin importar la dirección del mismo.

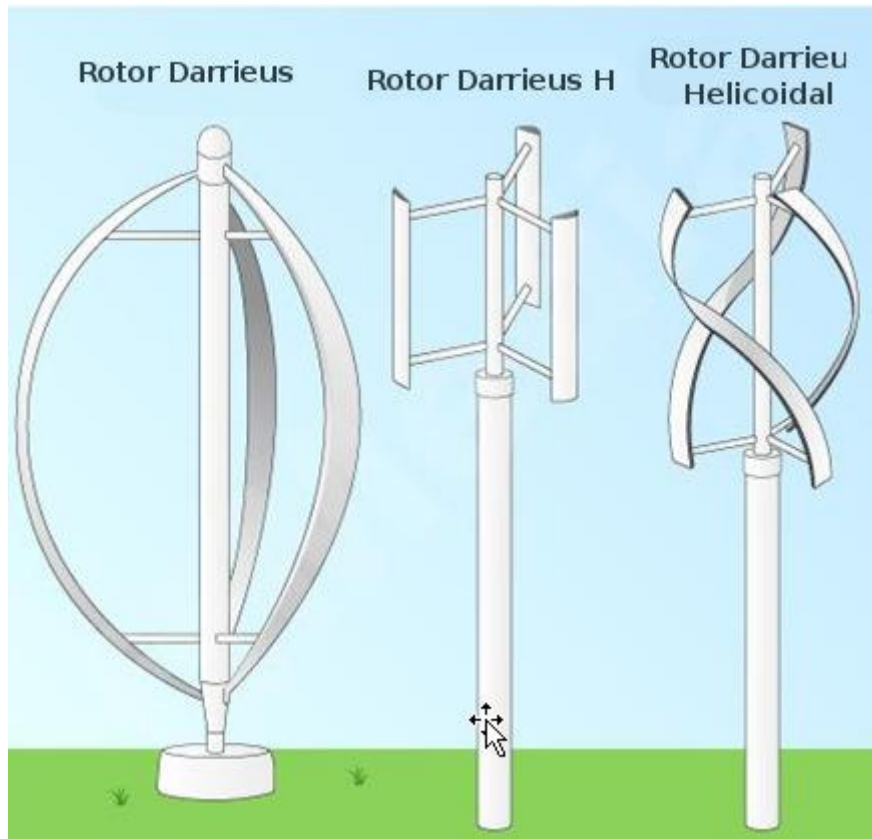


Figura 14. Tipos de Aerogeneradores de eje vertical  
[29]

Finalmente decir, que los parques eólicos se pueden construir tanto en tierra, como es lo habitual, como en el mar, denominados estos últimos como parque *Off Shore*. Este último tipo de instalación dispone de un recurso eólico mayor a menor altura, ya que no existen obstáculos en el mar. El principal inconveniente es el coste de la instalación, debido a la dificultad de realizar la instalación en el fondo marino, además de las conexiones eléctricas.



Figura 15. Parque eólico offshore en Norfolk  
[30]

## 2.1.4.2. ENERGÍA MARINA

El potencial que tenemos en los océanos y mares es increíble, ya que podemos utilizar tanto las mareas como las olas y corrientes marinas que existen. La disponibilidad de esta energía es incluso mayor que la del recurso eólico, y existen diferentes formas de aprovechar este recurso.

- **Energía Mareomotriz:** Consiste en el aprovechamiento del movimiento de las mareas ascendente y descendente, con el fin de utilizar la diferencia entre los dos estados que se forman. Se construyen diques con la altura suficiente para que el agua entre cuando la marea es alta, y poder moverlo cuando la marea esté baja a través de unas turbinas similares a las utilizadas en las centrales hidroeléctricas. El principal problema es que la diferencia de altura debe ser sustancial (unos 6 metros aproximadamente), y hay muy pocos lugares en el planeta con estas características.



Figura 16. Representación de una presa preparada para la tecnología mareomotriz.

[31]

- **Energía Undimotriz:** Es la energía que se produce a partir del movimiento de las olas. Mediante generadores que contienen partes móviles, se utiliza el movimiento relativo con respecto a un punto fijo para generar energía. Existen diferentes tipos de generadores que van desde las boyas flotantes hasta estructuras en la costa ancladas al fondo marino.



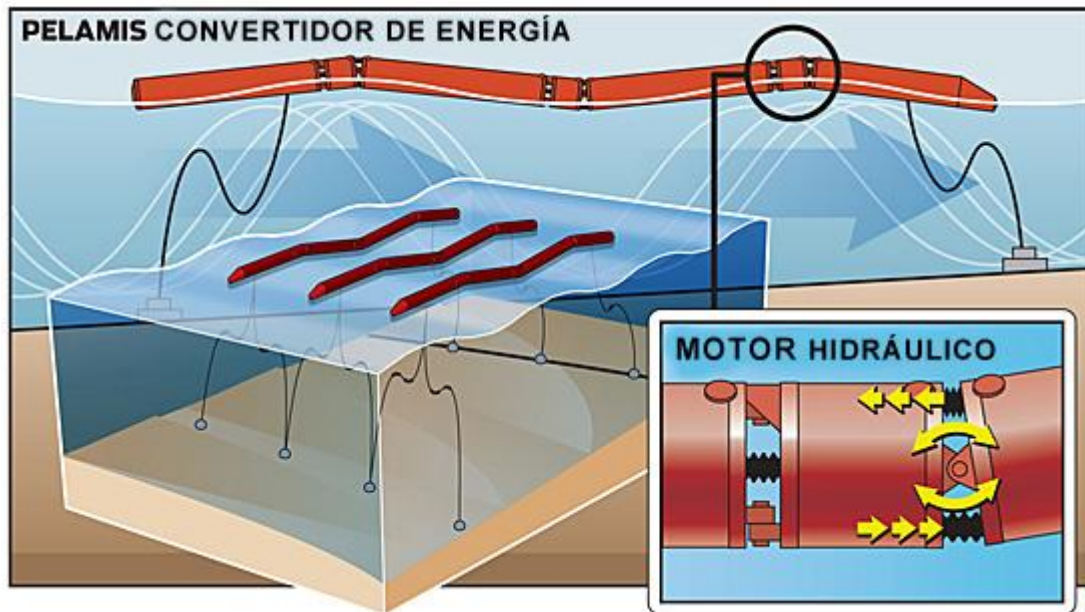


Figura 17. Dispositivos con partes móviles de tecnología undimotriz.  
[32]

- **Energía dada por Corrientes Marinas:** Se trata de una tecnología similar a los aerogeneradores eólicos. Son turbinas subacuáticas que giran a velocidades lentas para no dañar la fauna marina. Utilizan el movimiento de los mares producido por los cambios de temperatura.



Figura 18. Representación de generadores subacuáticos.  
[33]

### 2.1.4.3. ENERGÍA HIDRAÚLICA

La energía hidráulica utiliza el principio de la energía potencial que se produce por la diferencia de alturas en el salto del agua existente en las presas. Haciendo uso de turbinas convertimos esta energía potencial en energía eléctrica. Un hecho muy interesante es que se puede aprovechar la energía producida para bombear una buena parte del caudal de agua utilizado para reestablecer el nivel del embalse. La estrategia para las centrales hidráulicas es producir potencia en las horas de máxima demanda, cuando la energía es más cara, y bombear en los valles de la demanda.

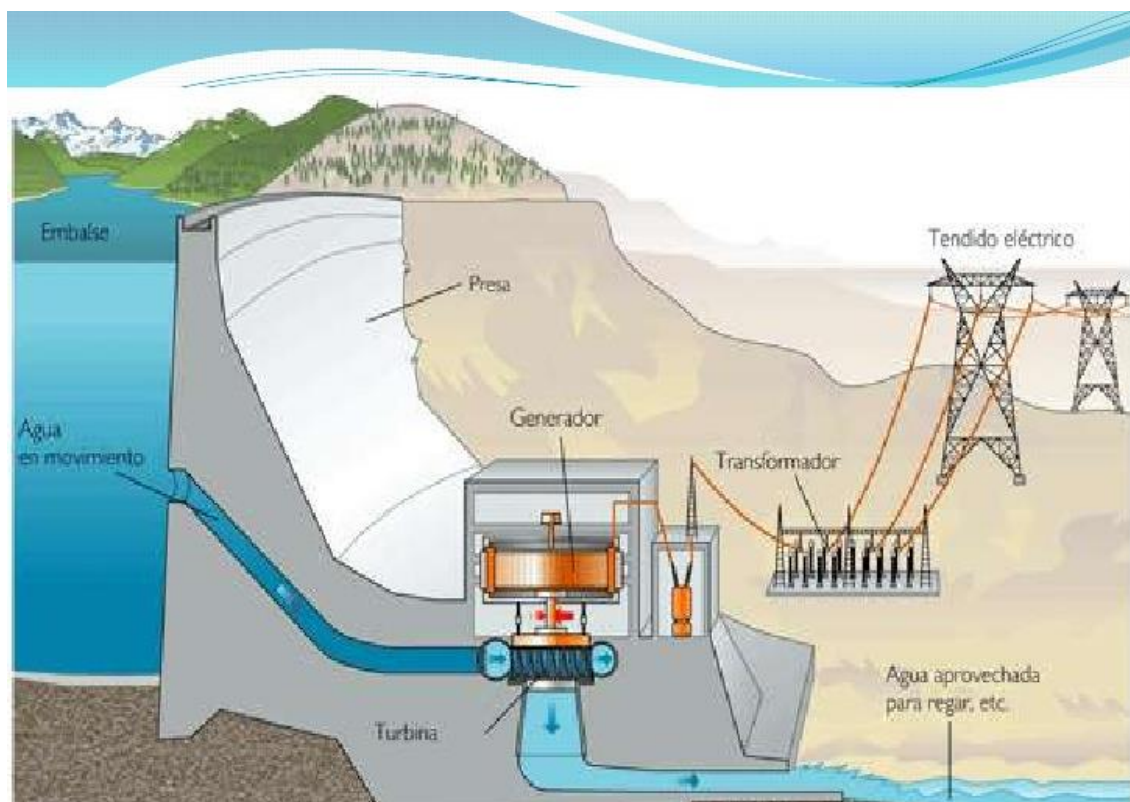
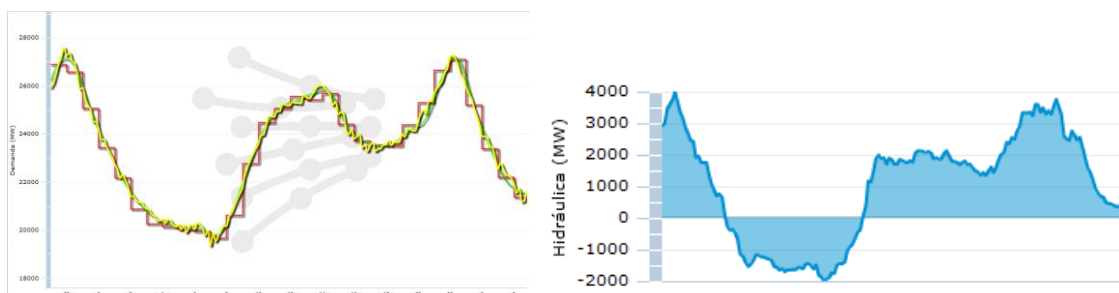


Figura 19. Representación de una central hidroeléctrica [36]



Figuras 20 y 21  
Demanda Eléctrica y Producción Hidráulica. REE. [34]

En las figuras 20 y 21 se muestra la demanda eléctrica del día 21 de mayo del 2017 junto con la producción de las centrales hidráulicas en España del mismo día. Se puede ver claramente la utilización del recurso hidráulico para generar energía durante el día, mientras que a horas nocturnas se bombea el agua. La potencia generada negativa indica que se consume potencia.

La potencia que puede llegar a suministrar una central depende de la altura del salto del agua y del caudal disponible. Dependiendo de estos dos factores se utilizan diferentes tipos de turbina para optimizar el rendimiento. Los tipos de turbina son las turbinas Pelton, Francis y Kaplan.

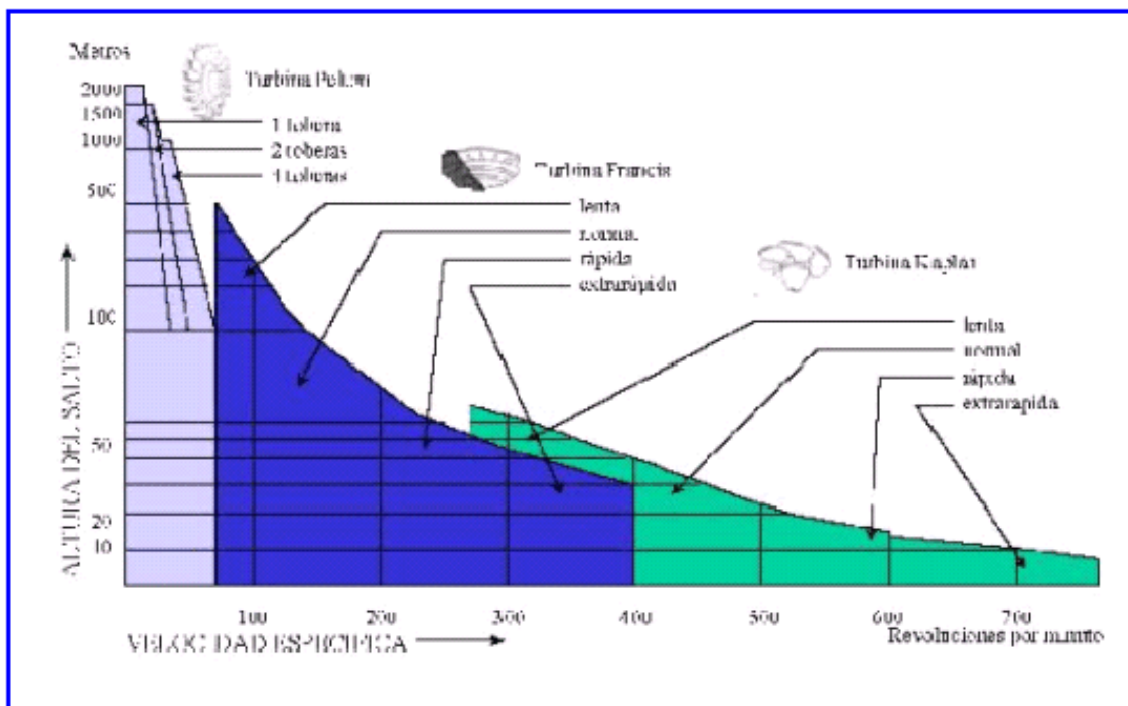


Figura 22. Comparativa de los diferentes tipos de turbinas hidroeléctricas  
[35]

#### 2.1.4.4. ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La principal diferencia de este tipo de tecnología con el resto de tecnologías renovables es que no transforma energía mecánica en energía eléctrica, sino que se produce mediante un proceso físico llamado *efecto fotovoltaico*.

La energía solar incide sobre las células por medio de fotones cargados de energía. Las células fotovoltaicas forman módulos, uniéndose en serie unos con otros. Dentro de las células, los fotones irradiados chocan con los átomos del material provocando una reacción en la capa de electrones, lo que crea una corriente eléctrica muy pequeña.

Si se unen varios módulos se forma una placa fotovoltaica y, gracias a la suma de varias placas, se consigue producir una potencia importante para que sea transportada. Por último, hay que señalar que la corriente saliente de las placas se genera en corriente continua y, por tanto, se necesita un inversor para convertirla en alterna antes de transformarla a alta tensión para su transporte.

Estas células están formadas por silicio, un material semiconductor que tiene unas características muy particulares.

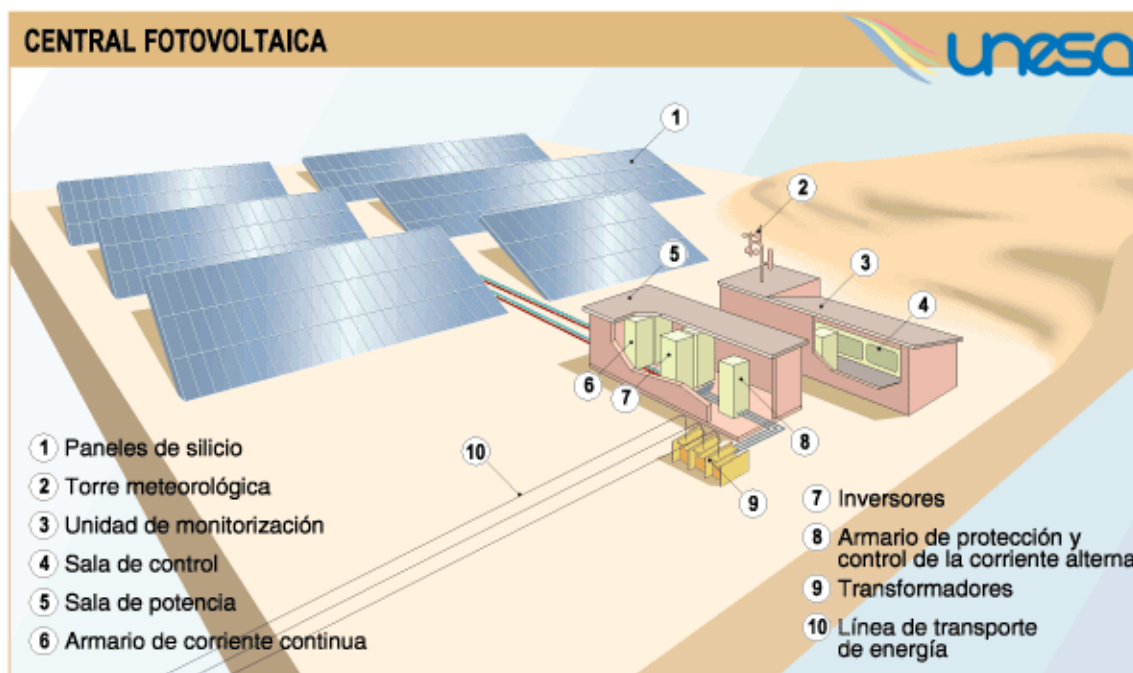


Figura 23. Representación de una central solar fotovoltaica  
[37]

Como es lógico el rendimiento de estas instalaciones depende fundamentalmente de la radiación emitida por el sol, los ángulos de incidencia y de la ubicación de la planta. Uno de los principales inconvenientes de esta tecnología es el rendimiento tan bajo que tiene. Por tanto, repercute directamente a la inversión necesaria para su construcción.

Dado que la energía térmica solar es el objeto de este trabajo, se explicará detalladamente en el capítulo 3.



## 2.2. EL TRANSPORTE Y LA DISTRIBUCIÓN DE LA ELECTRICIDAD

Una vez generada la electricidad en las diferentes plantas, las actividades responsables de mover dicha energía son el transporte y la distribución. Son las que hacen posible que llegue potencia a los nudos de consumo.

En España se considera que la red de transporte es aquella en la que sus elementos tienen una tensión nominal igual o mayor que 220 kV, incluyendo las interconexiones nacionales (entre islas) e internacionales. La actividad del transporte es llevada a cabo por los transportistas, entre los que el principal es el Operador del Sistema, Red Eléctrica de España.

Tanto el transporte como la distribución se consideran monopolios naturales de carácter regulado, ya que no tendría sentido que hubiera instalaciones y equipos redundantes en la red. La misma red de distribución puede ser usada por distintos agentes.

Como la generación y la demanda casi siempre están separadas físicamente, las redes son las que conectan ambos extremos, y por tanto garantizan el suministro y permiten la competencia entre los diferentes agentes. Por ello es necesario que existan diferentes organismos reguladores que gestionan las redes para que exista una competencia real.

Por otra parte, la distribución es aquella que transmite la energía eléctrica desde las redes de transporte hasta los nudos de consumo. Puede suceder que directamente existe transmisión de potencia desde una planta de generación, sin que sea necesario pasar por la red de alta tensión. El objetivo final es que los consumidores finales tengan un suministro de calidad.

Las redes de distribución son aquellas con una tensión menor a 220 kV. Suelen dividirse en red de reparto, con tensiones de 132, 66 y 45 kV y en redes de baja tensión, con tensiones nominales menores a 1 kV.

Las principales tareas que se realizan en las redes son la planificación de la inversión, la construcción, el mantenimiento y la operación de las instalaciones de la red, que las forman las líneas y subestaciones.

Existen dos tipos de líneas:

- Líneas aéreas: son utilizadas principalmente en el transporte de largas distancias. En la red de distribución se utilizan en zonas rurales. Son conductores desnudos que recorren toda la distancia a una tensión elevada, minimizando así las pérdidas por el efecto Joule. Dichos conductores suelen ser de aluminio o aluminio reforzado con acero para una mayor conductividad y resistencia del cable entre

los apoyos de la línea. Dependiendo de la tensión a la que se efectúa el transporte, los apoyos son de diferente altura.

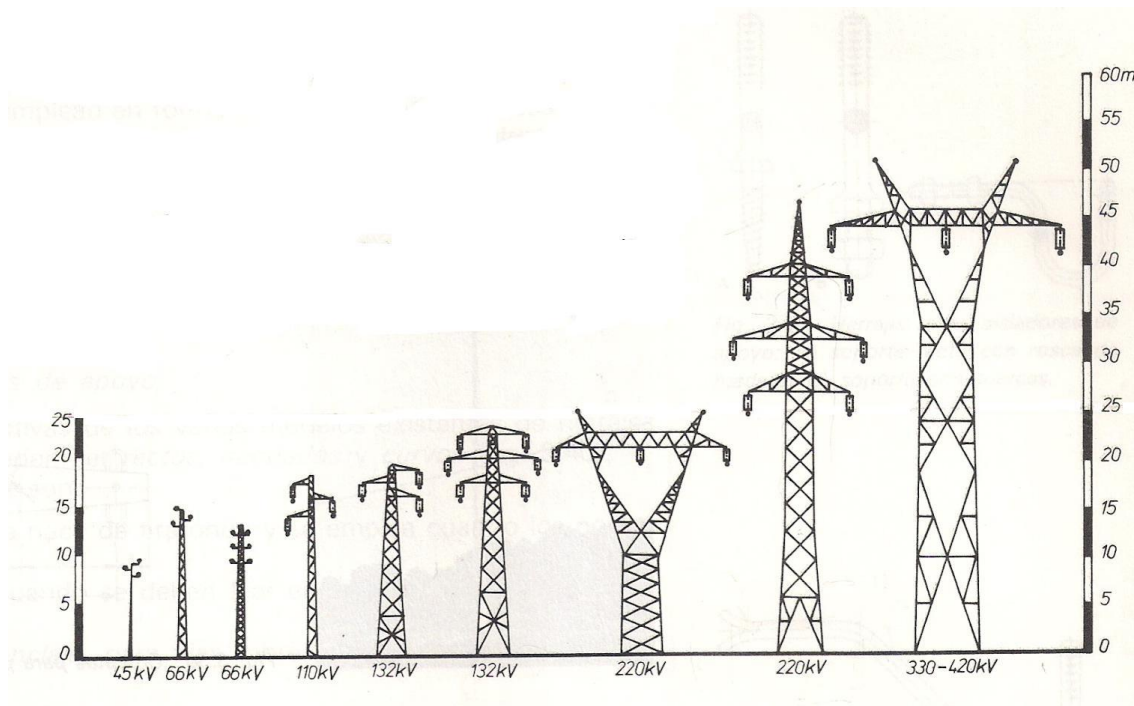


Figura 24. Diferentes tipos de apoyos según la tensión  
[39]

- Cables aislados: son utilizados en zonas urbanas, donde no es posible realizar tendido eléctrico. En estas zonas las tensiones son menores (tensiones de distribución y consumo) y los cables están aislados y protegidos para aportar mayor seguridad al consumidor final. En zonas muy pobladas es inevitable realizar este tipo de línea, pero es mucho más costoso.

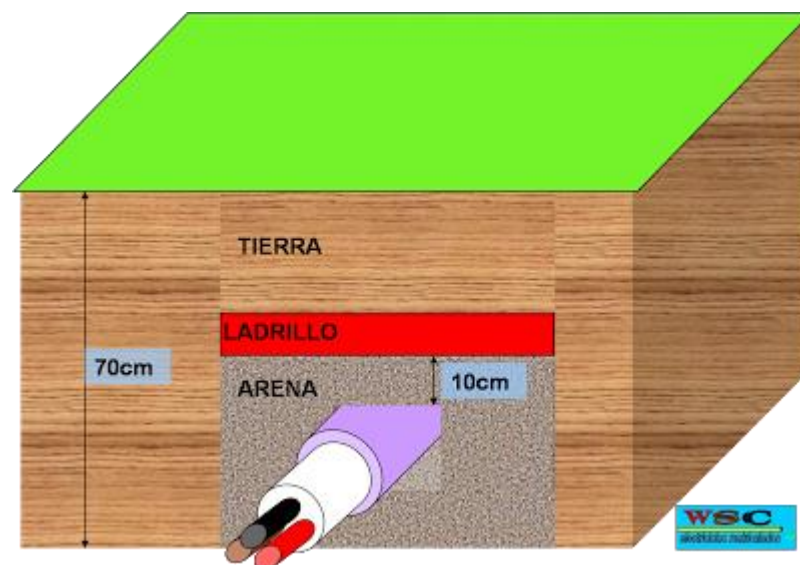


Figura 25. Diagrama de un cable subterráneo [40]

En esta parte del sistema eléctrico es donde más seguridad y control se debe tener. Para poder satisfacer la demanda eléctrica es necesario que todo el sistema sea fiable, pero en especial el transporte de la energía, ya que una avería podría ocasionar cortes de suministro en diversas zonas. La solución se ha ido desarrollando con los años con la creación de una red interconectada entre sí, mallando las redes eléctricas de tal manera que tengamos un grado de fiabilidad muy alta.

Las características del sistema eléctrico varían dependiendo del país y de la parte del mundo en la que se encuentre. En España la frecuencia de las redes es siempre de 50 Hz con variaciones menores al 0,5% cuando existen diferencias entre generación y demanda. Por lo general se usa corriente alterna para la transmisión y distribución de la energía eléctrica, salvo en algunos casos como son la interconexión con Francia o la interconexión submarina con las Islas Baleares desde Valencia. Ambos casos utilizan la tecnología HVDC (*High Voltage Direct Current*), que traducido al castellano significa Corriente Continua de Alta Tensión.

Entre medias de la generación y el transporte y el transporte y el consumidor final existen las subestaciones. Estas instalaciones son las mediadoras entre ambos extremos de la red. Aumentan o disminuyen la tensión de las líneas según corresponda.

### **2.3. COMERCIALIZACIÓN Y CONSUMO**

La comercialización es la última fase del viaje de la energía en el sistema eléctrico. Es una actividad liberalizada que gestiona los procesos de venta de electricidad a los consumidores finales. Con la liberación del mercado eléctrico que se ha ido produciendo paulatinamente durante el siglo XXI, han ido surgiendo empresas comercializadoras en todo el territorio. Actualmente existen más de 200 empresas comercializadoras de mercado libre.

El funcionamiento del mercado eléctrico español se explica en el capítulo 4 de esta memoria.

# **CAPÍTULO 3**

## **LA ENERGÍA TERMOSOLAR**

Se ha dejado aparte este tipo de energía renovable para explicarla en más detalle, dado que es la tecnología en la que se centra esta memoria.

Anteriormente, en el capítulo 2 hemos comentado la importancia que tiene la estrella de nuestro sistema solar para proporcionar energía en el planeta. Prácticamente todas las fuentes de energía que existen tienen relación directa o indirecta con el sol.

La radiación solar es la causante de estos procesos. Partiendo de la base de este proyecto, que es el uso de la radiación solar como fuente de energía principal, es necesario explicarla y analizar cómo aprovechar su máximo potencial. Hay que intentar “capturar” la mayor parte de esta energía.

### **3.1. EL ORIGEN DE LA ENERGÍA TERMOSOLAR**

Hasta donde alcanza la historia documentada del hombre, siempre se ha intentado sacar partido de la energía proveniente del astro más brillante de nuestro firmamento. Existen documentos que datan de la época de la civilización griega en los que se habla de la concentración de los rayos del sol para producir y mantener fuego en recipientes especialmente pensados para esta finalidad.



Figura 26. Reproducción moderna de una Skaphia griega  
[41]

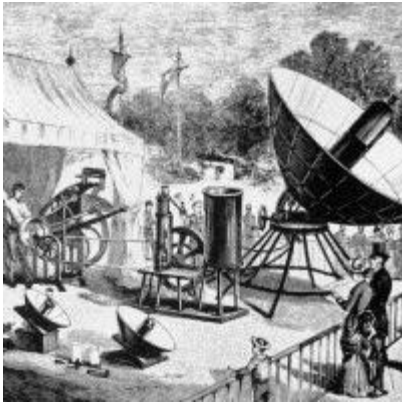
Además, un gran hito de la antigüedad fue el uso de la radiación solar como arma. El maestro griego Arquímedes en el siglo III A.C. creó un sistema de defensa mediante espejos instalados en la muralla de la ciudad. Los espejos reflejaban los rayos del sol contra los barcos enemigos y concentraban el calor en la madera. Con las circunstancias climatológicas apropiadas los barcos comenzaban a arder en pocos minutos.



Figura 27. Grabado de la Antigüedad.  
[41]



Más adelante, en el siglo XVIII, ayudado por los estudios de Arquímedes y Leonardo Da Vinci, Horace de Saussure construyó la “*caja caliente*”, utilizando el principio del efecto invernadero. Con una caja de cristal aislada con un cristal tintado de color negro y con ayuda de la radiación solar era capaz de conseguir una temperatura que alcanzaba los 109°C. A partir de este invento se elaboraron diferentes artilugios solares hasta alcanzar los hornos solares.



Inspirado en la caja de Saussure, el francés Auguste Mouchot aportó diversos ingenios solares como la cocina solar, modelos de concentradores solares e incluso una máquina de vapor alimentada por energía solar. Ya entonces el inventor galo no creía que solo el carbón fuera capaz de mantener todo el desarrollo industrial que se estaba dando en aquellos años.

Figura 28. Máquina de Vapor de Mouchot  
[42]

Debido al éxito que tuvo, el gobierno francés le encomendó la tarea de crear una gran turbina solar para la exposición internacional de París de 1878.

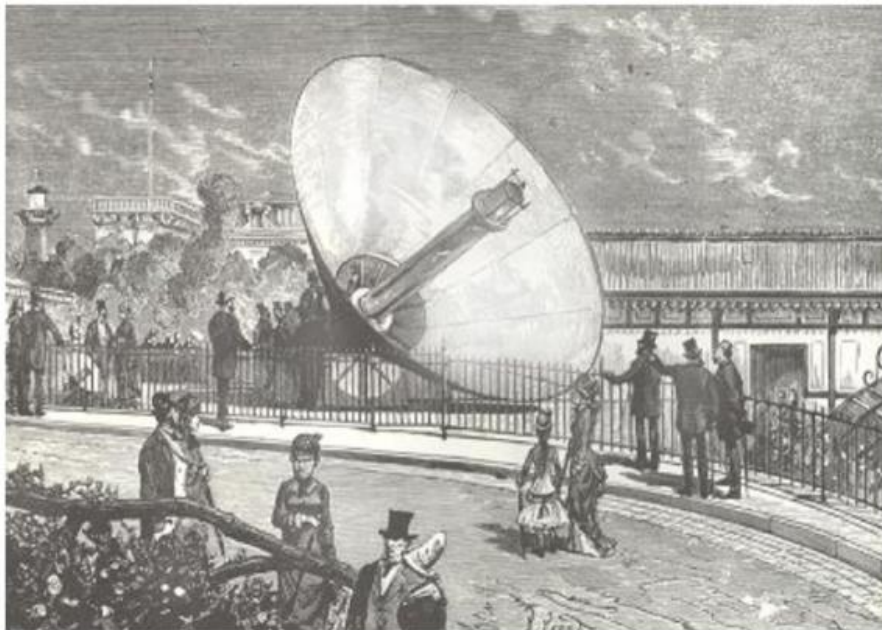


Figura 29. Primer receptor solar de Mouchot  
[43]

Por desgracia todos los inventos que utilizaban la potencia solar no tuvieron el apoyo necesario para seguir desarrollando esta tecnología tan novedosa entonces. La producción del carbón se abarató debido a la gran revolución industrial de la época y la energía termosolar era demasiado costosa y cayó en el abandono.

En este siglo ya en España, la tecnología moderna termosolar tuvo un mayor desarrollo a partir del año 2007. En el sur del país se comenzó a instalar centrales de potencia solar con la tecnología de torre central. Debido a las ayudas a las tecnologías renovables se han construido decenas de centrales con un total de 2300 MW instalados. (Dato del año 2014).

Debido a la supresión de los beneficios que tenían estas centrales, no se ha vuelto a invertir para la creación de nuevas plantas, ya que la inversión es muy grande y el retorno lento.

### 3.2. LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es aquella emitida por el sol en forma de ondas electromagnéticas. La cantidad total de radiación es aproximadamente unos  $1400 \text{ W/m}^2$  al día. Pero no toda ella es aprovechable. Se pierde casi un 30% del total reflejada en la superficie de la Tierra

El total de la radiación solar se divide en tres partes: la radiación directa, difusa y reflejada. La directa es aquella que llega directamente del sol. Cuanta menos precipitación exista en la atmósfera, mayor radiación habrá. En un día soleado se podría alcanzar los  $1000 \text{ W/m}^2$ . La difusa es aquella que procede del efecto de dispersión que provoca la materia de los objetos. Y la reflejada es aquella que proviene de la reflexión de la superficie terrestre. La suma de las tres debe dar el total de la radiación procedente de la estrella.

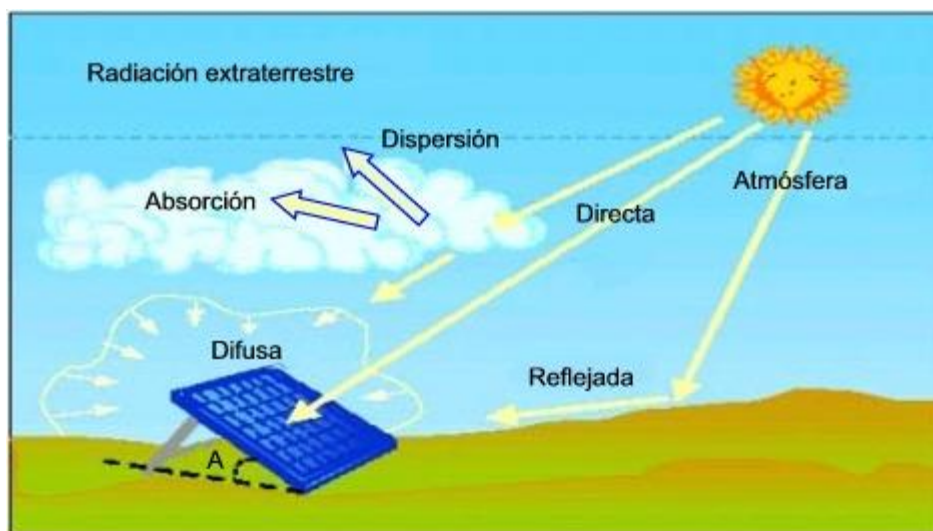


Figura 30. Dibujo de la radiación solar proyectada sobre un colector solar  
[49]

De las tres partes, sólo es útil la radiación directa. Por ello las centrales termosolares deben estar situadas en zonas donde, a lo largo del año, haya un porcentaje muy alto de días soleados.

La radiación solar que llega al planeta Tierra depende del movimiento del globo con respecto al sol. Esta traslación hace que durante el año tengamos niveles de radiación diferentes. Lógicamente también se debe tener en cuenta el movimiento de rotación terráqueo, que hace que tengamos la noche y el día.

La eclíptica del sol varía de norte a sur a lo largo del año de tal manera que la radiación solar disminuye en los meses de invierno y aumenta en los meses de verano. España, al estar situada en el hemisferio norte, tiene una eclíptica que no llega nunca a la vertical, sino que se queda retrasada.

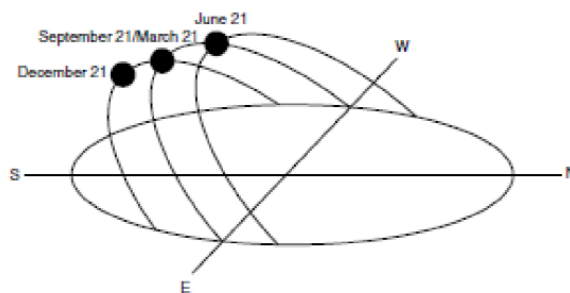


Figura 31. Movimiento de traslación de la tierra.  
[25]

### 3.2.1. ÁNGULOS SOLARES QUE AFECTAN A LA RADIACIÓN

Intentando explicar los parámetros que influyen en la incidencia de la radiación solar en los posibles campos solares, es necesario analizar los diferentes ángulos que afectan al recurso solar en una zona concreta. Algunos de los ángulos que vamos a estudiar son:

- Declinación Solar: Es el ángulo que forma la proyección de la recta que une los centros de la Tierra y del sol con el eje horizontal de la Tierra que pasa por el ecuador. Este ángulo tiene un valor máximo de  $23,45^\circ$ , que es el ángulo que forma el eje polar con respecto al eje eclíptico (perpendicular a la recta antes mencionada). Este ángulo varía con el movimiento de traslación de la tierra entre  $23,45^\circ$  y  $-23,45^\circ$ .



Figura 32. Declinación solar.  
[45]



- Ángulo Horario: Es el ángulo producido por la rotación de la tierra. Este movimiento tarda en producirse 24 horas, y divide la superficie terrestre en meridianos.

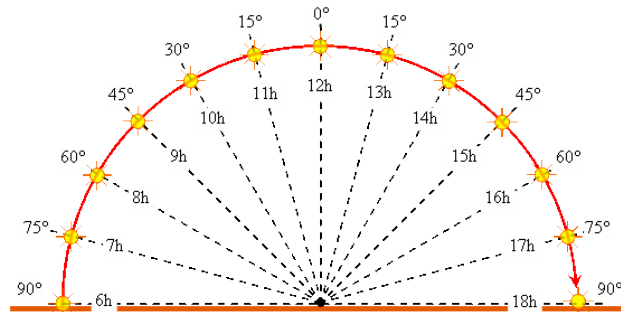


Figura 33. Movimiento del Sol durante el día  
[46]

- Ángulo de Incidencia: Se define como el ángulo formado entre la dirección de los rayos solares y el eje vertical de la superficie donde se realiza la medida. Éste varía a lo largo del año siendo más pronunciado en los meses de invierno.

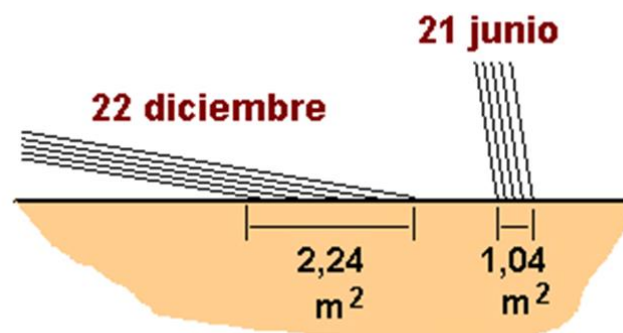


Figura 34. Incidencia del sol en diferentes días [47]

- Ángulo de Inclinación: Ángulo que necesita la unidad colectora respecto al suelo para aprovechar al máximo la radiación solar.

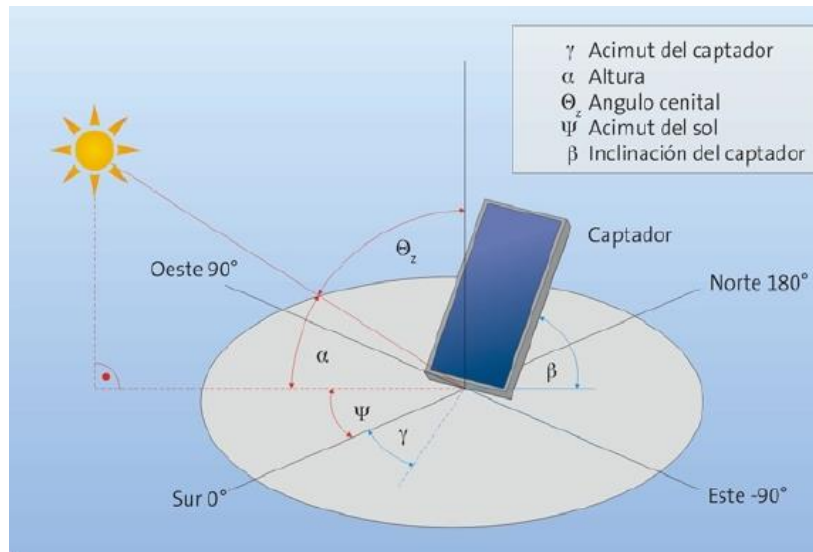


Figura 35. Explicación de los diferentes ángulos en una placa  
[48]

Además, existen otros ángulos para tener una referencia total como son el ángulo de altitud solar, el ángulo azimutal, el ángulo azimutal de superficie o el ángulo cenital.

### 3.2.2. GEOMETRÍA DEL CAPTADOR

Adelantando este apartado a la explicación de los diferentes tipos de tecnologías, se explica cómo obtener el mayor rendimiento con la correcta colocación de los captadores solares.

Teniendo en cuenta todos los ángulos nombrados y explicados en el apartado anterior, y conociendo las distancias entre los colectores y, en el caso de una planta de torre central, la altura de ésta, se configura la posición de los receptores en el campo de heliostatos.

En principio la tecnología que más percances puede sufrir con respecto a dicha geometría y con los posibles impedimentos meteorológicos es la tecnología de torre central, ya que en las demás el colector está más cerca de la superficie reflectora.

Algunos efectos adversos son a causa de una mala colocación de los reflectores en el campo de heliostatos. En algunos casos se pueden llegar a formar sombras o bloqueos en algunas horas del día.

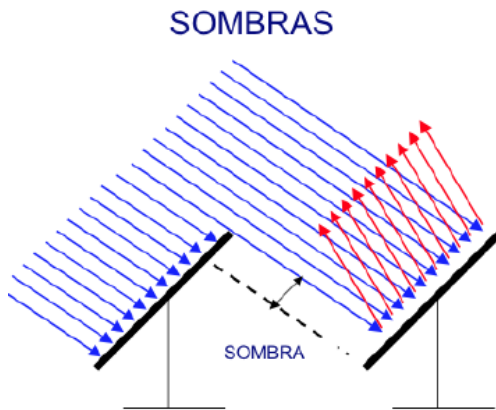


Figura 36. Dibujo explicativo de las sombras [50]

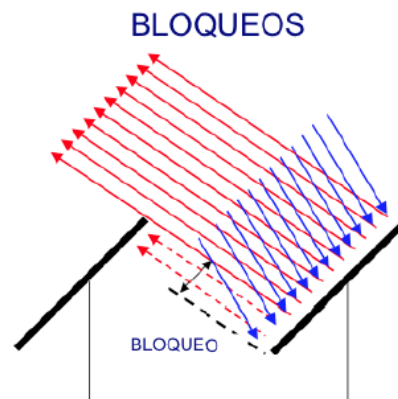


Figura 37. Dibujo explicativo de los bloqueos [50]

Pueden ocasionarse otros efectos no deseados como el desbordamiento de flujo, que consiste en que el receptor no absorbe todo el flujo posible debido a que no están alineados. Por supuesto también existen los efectos meteorológicos como las nubes, que alteran el rendimiento de la planta.

Por último, se debe tener en cuenta que, para seguir el movimiento solar, hay que orientar los captadores a lo largo de la eclíptica para que la radiación incidente sea lo más constante posible. Para ello existen unos equipos denominados seguidores solares que realizan esta tarea. Se explican en detalle en el siguiente apartado.

### 3.3. LOS COMPONENTES DE LA CENTRAL TERMOSOLAR

Las plantas termosolares, como ya se ha mencionado en anteriores apartados, captan la radiación solar directa para crear energía eléctrica. Utilizando un fluido caloportador que transporta la energía en forma de calor captada y un ciclo de vapor (ciclo Rankine), se acciona una turbina acoplada a un generador eléctrico.

Para poder explicar mejor el funcionamiento de la central, se dividirá en dos partes: el campo solar y el bloque de potencia.

#### 3.3.1 EL CAMPO SOLAR

El campo solar es donde comienza el proceso de transformación para obtener la energía deseada. Se compone del receptor y de los colectores. Dependiendo de la tecnología su forma varía, pero los principios son los mismos para todos. Los colectores se encargan de captar y de reflejar la luz incidente del sol hacia los receptores, en donde la concentración

de los haces de luz produce un aumento de la temperatura que aprovechamos con nuestro fluido caloportador.



Figura 38. Planta en Chile de Acciona  
[52]



Figura 39 Campo solar de PS20  
[53]

Como se ha explicado anteriormente, es necesario estudiar a fondo la disposición de los receptores para no crear sombras, bloqueos o desbordamientos de flujo.

En las tecnologías cilindro parabólicas y de Fresnel, el receptor es lineal, distribuido por todos los colectores, mientras que en la tecnología de torre central el receptor es un único punto a gran altura, llegando a alcanzar temperaturas muy altas.

Concentrador	Lineal	Puntual	
Discreto	<p>Espejos Fresnel</p>	<p>Sistemas de torre</p>	Foco fijo (Evacúa el calor más fácilmente)
Continuo	<p>CCPs</p>	<p>Disco-Stirling</p>	Foco móvil (Recibe más energía)

Figura 40. Diferentes Tipos de Tecnologías  
[51]

Para conseguir el mayor número de horas útiles de recurso solar, es necesario realizar un seguimiento diario del sol desde por la mañana hasta el atardecer. Mediante unos dispositivos llamados seguidores solares, el receptor es capaz de realizar el movimiento necesario para dicho cometido.

Estos sistemas funcionan con unos sistemas de motores que, mediante sensores, son capaces de gestionar la mejor posición en cada momento. Dependiendo de los grados de libertad en el eje, se clasifican en seguidores solares de un solo eje y seguidores solares de dos ejes.

-Seguidores de un eje: son aquellos que fijando un eje alineado con la posición norte-sur o este-oeste, rotan en el eje libre para seguir el movimiento solar. Existen dos tipos: los que fijan la posición en el eje polar terrestre (norte-sur) y los que fijan la posición en el eje este-oeste.

-Seguidores de dos ejes: son aquellos que rotan en ambos ejes y consiguen encontrar la posición del sol en todo momento. Se denominan seguidores “*full-tracking*”.

### 3.3.2. EL BLOQUE DE POTENCIA

Una vez actúan los receptores y los colectores captan la energía en forma de calor, comienza el bloque de potencia. A través del fluido térmico se transmite el calor hacia el fluido que es usado en el ciclo de la central, habitualmente agua. Con la turbina perteneciente al ciclo se genera electricidad.

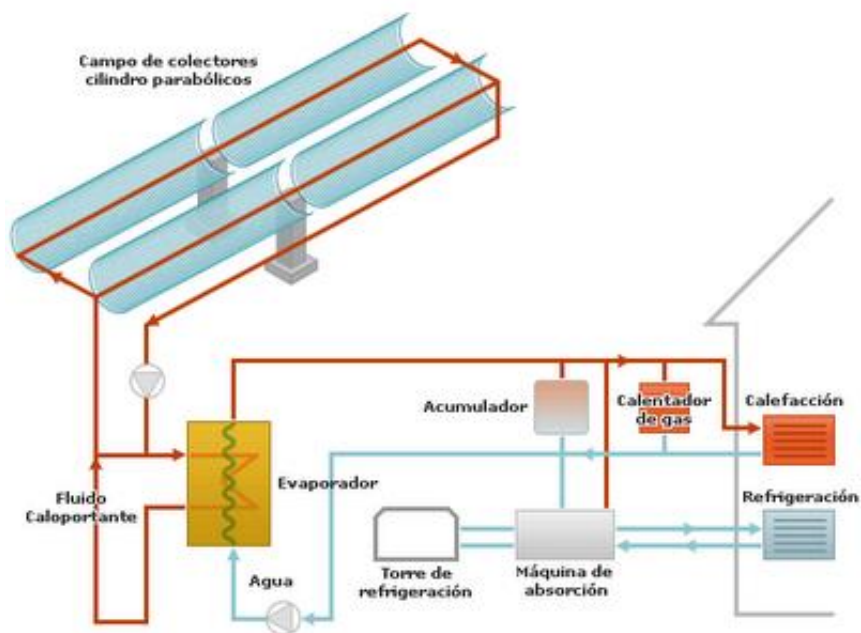


Figura 41. Diagrama de una central termosolar CCP  
[37]

A continuación, se explica el fluido caloportador y los diferentes tipos. El ciclo de vapor utilizado ha quedado explicado en los capítulos anteriores y por tanto no se explica en éste.

- HTF (*Heat Transfer Fluid*): Habitualmente se trata de un sistema de sales fundidas que transmiten muy bien el calor. Como este tipo de fluido no se puede introducir en el ciclo de vapor, son necesarios circuitos independientes. Una de las ventajas que tiene es que alcanza temperaturas muy altas. La principal desventaja es que se deben mantener siempre con calor latente, ya que por debajo de una cierta temperatura las sales solidifican.
- DSG (*Direct Stream Generation*): En este caso el fluido es agua, y por consiguiente se puede simplificar a un único circuito. Así recorre el ciclo completo pasando por todos los estados. La ventaja es que se abaratan los costes al reducir a uno el circuito necesario. La desventaja es que la temperatura alcanzada en los receptores es menor.

### 3.3.3. ALMACENAMIENTO

El almacenamiento de la energía se considera un factor principal en el desarrollo de las tecnologías de generación. La electricidad producida debe emplearse en el momento de su generación, ya que no es posible almacenarla en esta forma. La manera de almacenar la energía es en baterías químicas, en combustibles fósiles o en forma de calor.

El almacenamiento de la energía térmica ha sido siempre el reto a conseguir en las centrales solares. En los últimos años ha surgido el elemento de las sales especiales como fluido caloportador. Una ventaja que no se ha mencionado antes es su capacidad de retención del calor durante largos periodos de tiempo.

Por eso la idea de utilizar dichas sales como fuente de almacenamiento no es en absoluto descabellada. Cualquier otro medio es ineficaz para las cantidades de energía que se manejan en estas centrales.

Las sales utilizadas son habitualmente algunos tipos de nitratos. Deben encontrarse en estado líquido para que puedan fluir por las tuberías. Para mantener este estado es necesario que la temperatura no descienda de los 230°C y, por motivos de seguridad y para que no se deterioren, no deben superar los 630°C.

### 3.4. TECNOLOGÍAS

Existen cuatro tecnologías bien diferenciadas en el mercado de la energía termosolar. Cada una de ellas tiene una temperatura de trabajo y un rendimiento diferente, dependiendo de las características propias, como viene explicado en la figura 42:

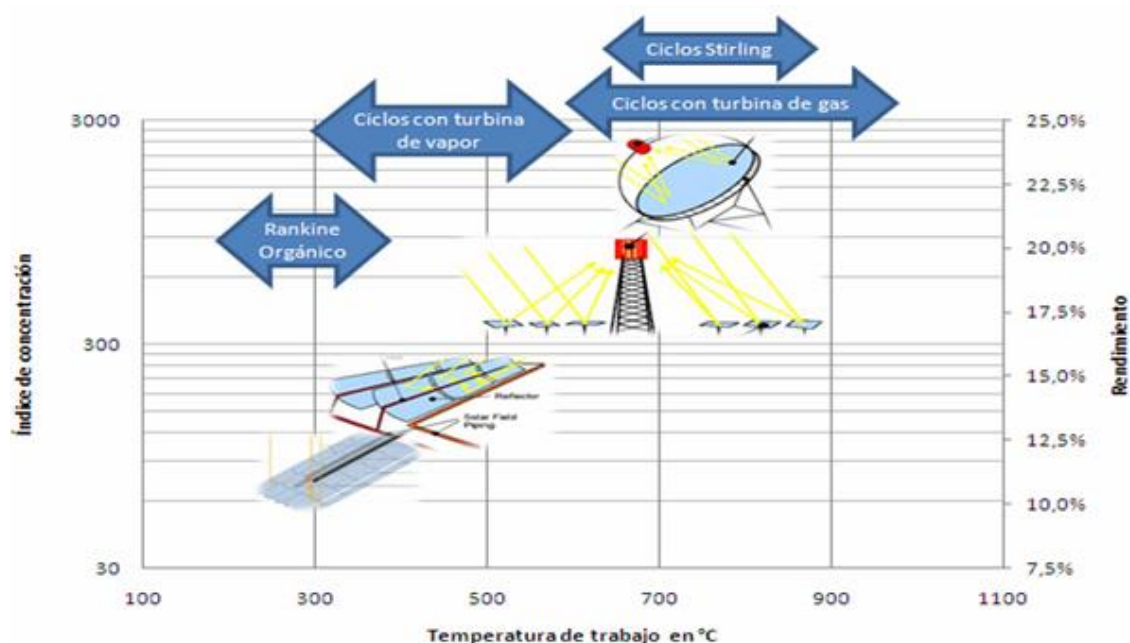


Figura 42. Tabla de rendimientos y de índice de concentración de las diferentes tecnologías termosolares.

[58]

A continuación, se explica de manera muy básica cada una de las cuatro tecnologías mencionadas:

#### 3.4.1. CENTRAL CON CAPTADORES CILINDRO PARABÓLICOS (CCP)

Como bien se puede observar en el propio nombre de la tecnología, la planta está formada por una serie de captadores con forma cilindro-parabólica. El receptor es un tubo que se sitúa en el eje central de la parábola por donde circula el fluido caloportador, habitualmente un aceite especialmente tratado, que se calienta hasta alcanzar unos 400°C.





Figura 43. Incidencia del Sol en los colectores de una central CCP  
[37]

Utilizando un tipo de seguidor solar de los que hemos hablado anteriormente, los captadores rotan en función del movimiento de sol. Así se consigue que la radiación solar incida directamente, con ayuda de los espejos, sobre el receptor.

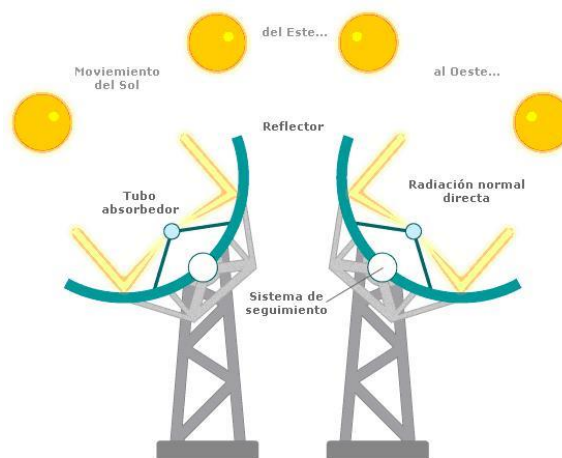


Figura 44. Ejemplo de un seguidor solar de este a oeste  
[55]

Este tipo de centrales funcionan con un ciclo de vapor integrado. Al tratarse de un fluido térmico distinto al agua, necesitamos dos circuitos para el intercambio de calor. El calor cedido al circuito del ciclo Rankine, generando vapor saturado, que es llevado a la turbina y al través del alternador se genera electricidad. El resto del proceso ya ha quedado explicado en los apartados anteriores.

En España el tamaño tipo de este tipo de centrales está entre 50 MW y 100 MW. El punto de rendimiento económico óptimo para este tipo de tecnologías se encuentra dentro de este rango.

Existen a día de hoy centrales que tienen integrados sistemas de almacenamiento con la tecnología de sales. Este tipo de centrales tienen un mayor número de horas de uso, ya que pueden ampliar su producción cuando el sol ya se ha ocultado.

### 3.4.2. CENTRALES DE RECEPTOR CENTRAL O DE TORRE (RC)

Este tipo de plantas tienen un funcionamiento diferente. La estructura de torre contiene el sistema receptor a una gran altura, donde se concentran los rayos del sol reflejados en el campo de espejos de heliostatos.

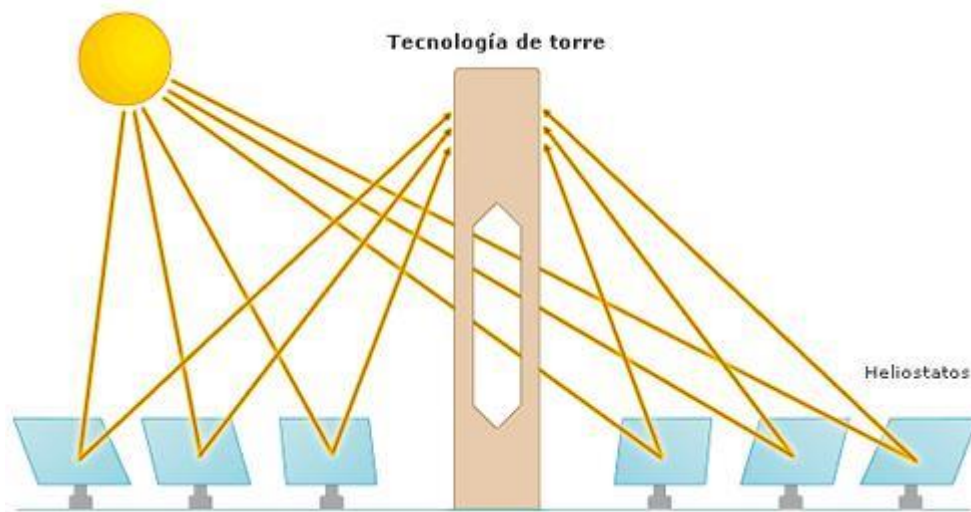


Figura 45. Dibujo de una central termosolar de torre  
[55]

Los espejos tienen normalmente un sistema de seguimiento de uno o dos ejes para poder seguir el movimiento solar durante todo el día. Sin este sistema sería muy complicado orientar los rayos hacia el receptor.

Desde el depósito de sales “frías”, a una temperatura de casi 300°C, se bombea el fluido fundido hacia el receptor para elevar su temperatura hasta alcanzar una temperatura de unos 550°C.

Las sales fundidas tienen dos finalidades: elevar la temperatura del circuito del ciclo de vapor y ser almacenadas como energía en forma de calor. Así se pueden utilizar cuando no haya recurso solar disponible.

Una vez convertido el fluido del ciclo de vapor en vapor saturado, el circuito es el mismo que se ha explicado en los distintos apartados en los que ha aparecido el ciclo Rankine. La turbina produce energía eléctrica a partir del alternador.

Las características de los heliostatos son muy particulares, ya que para que aprovechar el mayor espacio y que la distribución sea óptima, se colocan los espejos en círculos concéntricos alrededor de la torre, o en su defecto, si no es posible por el espacio disponible, en arcos con la torre como punto de centro.



Figura 46. Planta de Torresol Energy en Sevilla.  
[56]

Lo habitual en este tipo de tecnología es que las plantas no superen los 20 MW en el territorio español, pero pueden incluso llegar a los 150 MW en otros países. El rendimiento se encuentra alrededor del 20-25%, dependiendo si trabajan con almacenamiento o no.

### 3.4.3. CENTRALES DE CONCENTRADORES LINEALES FRESNEL (CLF)

Los colectores de las centrales Fresnel se basan en espejos planos alargados orientados hacia un receptor lineal que ocupa la misma distancia que el largo de los espejos. El receptor se encuentra a una distancia suficiente de los colectores para que para que todos sean efectivos y calienten de manera eficiente el fluido caloportador. Para optimizar la recepción de los rayos solares existe un reflector alrededor del receptor para concentrar las posibles desviaciones.

Los espejos cuentan con un eje de rotación para seguir el movimiento del sol en todo momento.





Figura 47. Colectores y receptor de una central de concentradores lineales Fresnel  
[57]

Como se ha explicado en los casos anteriores, el objetivo de todas las centrales termosolares es aprovechar el calor producido por el sol para calentar el fluido de un ciclo de vapor. La posible diferencia en este caso es que el fluido puede ser agua. Se calienta a altas temperaturas y al tratarse de un solo circuito en el caso del agua, se bombea el vapor saturado directamente a la turbina.

Las ventajas que tiene este tipo de tecnología son, entre otras, su bajo coste y el mayor aprovechamiento del terreno del que se dispone. Por el contrario, los rendimientos son menores.

Las centrales con concentradores lineales suelen disponer de una menor potencia que las ya explicadas anteriormente.

#### **3.4.4. CENTRALES DE DISCOS PARABÓLICOS (DCP)**

Por último se explica la tecnología de los discos parabólicos (DCP), la menos desarrollada de las cuatro. La principal diferencia con todas las anteriores es su carácter modular, es decir, cada disco es independiente. Cada uno de estos colectores parabólicos puede proporcionar entre 3 y 30 kW, por lo que se puede alcanzar una potencia considerable uniendo varios de estos discos.

Están formados por una superficie de espejos parabólica de gran diámetro que concentran los rayos solares en un único punto, en el que se encuentra el receptor. Utilizan seguidores

de dos ejes para la captación solar, ya que deben seguir el movimiento del sol de manera precisa.



Figura 48. Discos parabólicos  
[57]

El fluido puede variar en este caso, llegando a utilizar incluso gas. La temperatura que alcanza puede superar los  $700^{\circ}\text{C}$ . Una vez alcanzada la temperatura consigna, el fluido mueve un motor instalado en cada disco que, unido a un alternador, produce potencia eléctrica.

Al ser cada uno de los módulos independientes al resto, el coste de instalación y mantenimiento es mayor que en cualquiera de las anteriores tecnologías. La ventaja más clara es que su rendimiento es superior al resto, al tratarse de un 35%.

El almacenamiento en este caso no es posible, ya que se produce energía eléctrica de manera instantánea. Sin embargo es útil disponer de baterías eléctricas para que la producción eléctrica sea lo más lineal posible.

# CAPÍTULO 4

## MERCADO ELÉCTRICO

El Mercado Eléctrico Español es donde se negocian los precios de compra y venta de la energía eléctrica dentro de la Red Eléctrica de España. Dentro de este existen varios tipos de mercados, como el del día anterior, el intradiario o el de plazo.

### 4.1. ORIGEN Y ACTIVIDADES DEL MERCADO ESPAÑOL

Hasta la década de los años 90, el sistema eléctrico español era una estructura regulada por el gobierno, el cual establecía el precio de la energía que se remuneraba en las actividades como la generación, el transporte o la distribución. En el año 1997 se empezó paulatinamente el proceso de liberación de los sistemas eléctricos, con el fin de crear un mercado con competencia y aumentar la eficiencia de todo el sistema. Se decide dividir las actividades para que tuvieran una clara diferenciación: generación, transporte, distribución, comercialización.

Las actividades de generación y comercialización actúan en régimen de competencia desde la liberalización que tiene efecto el 1 de enero de 1998 con la *Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del sector Eléctrico*. Por otra parte, las actividades de transporte y distribución se consideran monopolios naturales, ya que los ingresos que reciben son regulados por lo que no existe competencia, y por ende deben estar reguladas por ley. Dentro del sector de la distribución, existen cinco grandes empresas repartidas por la geografía española: Endesa, Iberdrola, Gas Natural Fenosa, Hc Energía y Viesgo.



Figura 49. Mapa de España con las empresas distribuidoras [4]

Todo este sistema debe estar coordinado por algún organismo independiente de los mercados para que no existan irregularidades. Por ello existen entidades como el Operador del Sistema, el centro de Control Eléctrico o el Centro de Control de Energías Renovables, entre otros, que actúan de organismos de control entre el sistema eléctrico y el consumidor final.

El operador del sistema [6], Red Eléctrica de España, realiza las previsiones pertinentes para garantizar el equilibrio perfecto entre la generación y la demanda. Debe cumplir las tres máximas de la energía: Continuidad, Calidad y Seguridad del suministro con cliente final.

El centro de control eléctrico (CECOEL), monitoriza todas las subestaciones de la red para tener una visión global del estado a tiempo real de la red, y poder actuar en las situaciones que lo requiera.

Es un detalle importante a tener en cuenta que no se puede participar con el mismo nombre empresarial en las actividades liberalizadas enumeradas anteriormente. Deben ser empresas distintas en todos los ámbitos, ya que esto podría generar ventajas que desvirtuarían la competencia existente.





Figura 50. Centro de control de Red Eléctrica de España  
[7]

## 4.2. MERCADO MAYORISTA

El mercado mayorista es el que gestiona la compra venta de la energía entre los grandes generadores eléctricos y las comercializadoras y los grandes consumidores autorizados. Se denomina mayorista por el volumen de energía que existe en las transacciones que se ejecutan. Un solo cliente mueve cantidades muy elevadas.

Analizando el funcionamiento del mercado mayorista se registran dos formas de venta de la energía: mediante contratos bilaterales entre generación y cliente o en la bolsa de energía, también llamado *pool*. A continuación, se muestran las acciones que se producen en el mercado de la compra y la venta de la energía para un día.

tiempo	Mercado	Gestor	Producto	
Antes del despacho (hasta D-1)	Mercado de contratos bilaterales	OTC, OMIP	Contratos a plazo físicos financieros	Mercado a plazo
	Mercado del día anterior	OMEL	Energía horaria	Mercado diario
Día anterior al despacho (D-1)	Mercado de Restricciones	REE	Restricciones técnicas y por garantía de suminist.	
	Mercados de SSCC: Reserva Secundaria Reserva Potencia Subir	REE	Secundaria: MW Terciaria: MWh	
	Intradiarios	OMEL	Energía Horaria	Mercados de corto plazo
Día del despacho (D)	Gestión de desvíos y restricciones técnicas en tiempo real Restricciones técnicas tras intradiarios Reserva Terciaria	REE	Energía a subir y bajar	

Figura 51 – Compra y venta de energía a través del tiempo para el día D.  
[2]

En los días previos al día del despacho, la energía se gestiona mediante los contratos bilaterales en el mercado a plazo. Los contratos bilaterales son acuerdos en los que se fija una cantidad de energía total durante un periodo de tiempo específico con un precio determinado entre la generación y los representantes de comercialización. Éstos se firman con semanas y meses de antelación. El objetivo principal de éstos es protegerse del riesgo que supone entrar en la bolsa de energía, ya que el precio puede fluctuar con respecto al acordado. Estos acuerdos reducen la capacidad total de la bolsa de energía

En el día de antes (D-1) comienza el mercado diario, y se distribuye la producción con la demanda del día en cuestión. Así se fija el precio y la cantidad total de la energía. Los generadores ofertan para cada una de las horas del día siguiente una determinada cantidad de energía a un precio determinado. Con la totalidad de las ofertas presentadas se genera una curva de oferta de venta de la energía. En el mismo proceso las comercializadoras y los grandes consumidores efectúan sus ofertas de compra y con todas ellas se forma la curva de demanda o compra de la energía. Cruzando ambas curvas con todos sus datos se obtiene la casación para cada hora.

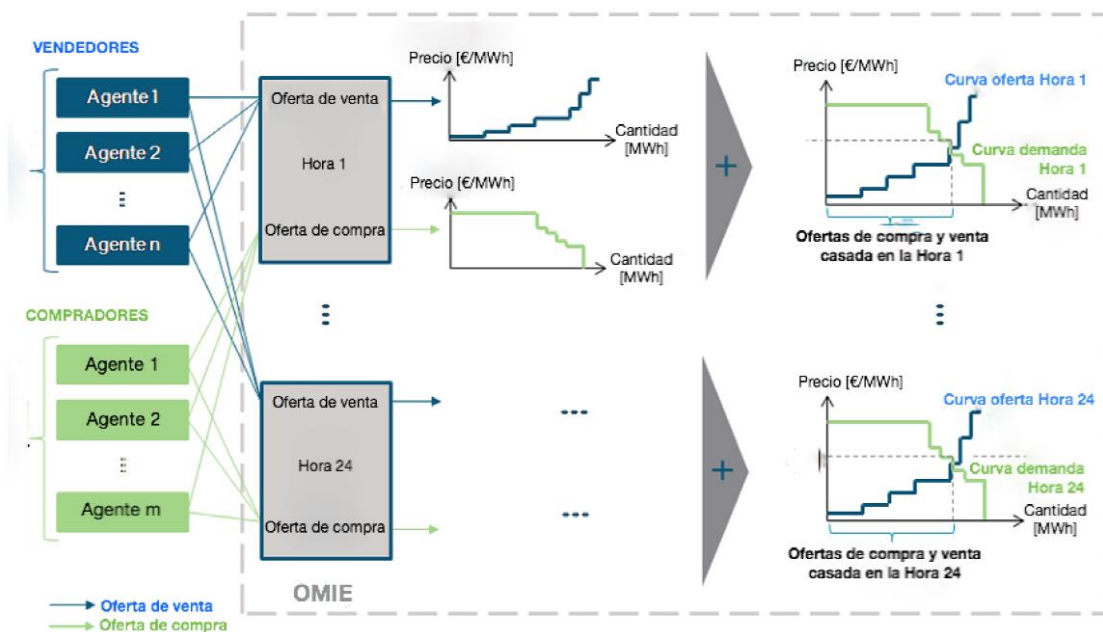


Figura 52 – Casaciones por hora de las curvas de oferta y de demanda.  
[3]

Este proceso de casación se ejecuta seleccionando las ofertas de venta de la generación más baratas primero, normalmente las centrales nucleares y las energías renovables, para continuar en orden ascendente con las más caras. Al final del proceso, el precio fijado con la central más cara que haya entrado en la casación es el que asigna a todas las centrales que van a producir en esa hora. Por esta razón se debe controlar exhaustivamente el proceso de la compra y la venta de la energía, para evitar el fraude que fácilmente se podría originar.

En la siguiente gráfica obtenida en la web de OMIE se muestra un pequeño ejemplo de las curvas de oferta de las que hemos hablado.

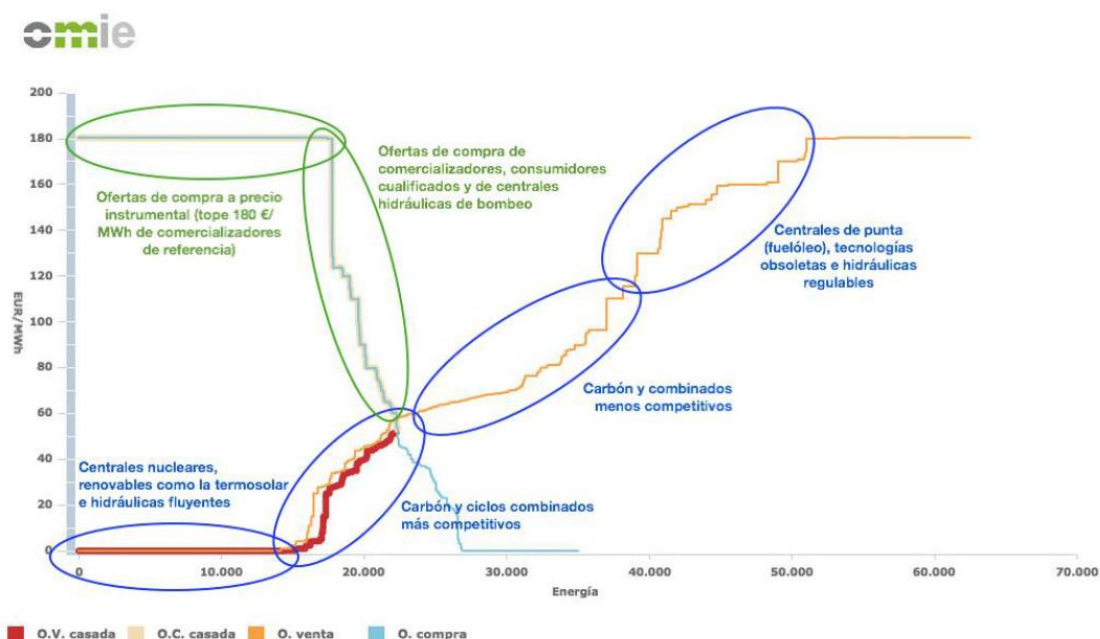


Figura 53. Curvas de compra y venta de la energía  
[8]

Se puede observar la curva de compra de la energía, línea azul, y la curva de venta de la energía, línea naranja, ambas sin casar aún. Estos datos son los obtenidos en el día anterior, y durante la casación se van modificando, curvas de compra y venta (rosa y roja respectivamente), por los valores reales de este día. Durante el día se gestionan en los mercados intradiarios los ajustes que se deben ir produciendo debido a los posibles fallos de generación o variación de la demanda. Estos percances se corrigen de inmediato y no suelen generar problemas graves. Los integrantes que han sido autorizados para operar el día anterior pueden seguir realizando acciones durante las seis sesiones que se habilitan durante el día. De este modo se mejora el proceso de casación y la generación y la demanda son casi idéntica.

#### 4.3. MERCADO MINORISTA

El mercado minorista recibe su nombre debido a sus consumidores, donde la potencia contratada es menor que la que pueden tener los grandes clientes del mercado mayorista. A pesar de este hecho, el volumen energético gestionado es enorme.

En este mercado los agentes comercializadores, que previamente ya han adquirido la energía en los mercados mayoristas, la venden a los pequeños consumidores, que suelen ser en su mayoría los clientes domésticos. La empresa comercializadora siempre tiene que tener en cuenta el posible consumo que le pueden demandar sus clientes.

La facturación de la energía que se les vende a los consumidores se realiza a partir de unas tarifas eléctricas ya estipuladas. Dependiendo de la tensión del consumidor y de la potencia contratada se elige la tarifa correspondiente. Dichas tarifas se denominan tarifas de acceso, ya que abonándolas podemos acceder a las redes de distribución de sistema eléctrico.

Existen las tarifas de baja tensión, como por ejemplo la tarifa 2.0DHS o la tarifa 3.0A; y tarifas de alta tensión, como la tarifa 3.1A. Se considera alta tensión a los puntos de suministro que superan los 1000V. Una de las más utilizadas por los pequeños consumidores es la tarifa PVPC (Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor), en la que se protege en gran medida el desconocimiento del funcionamiento del mercado.

#### **4.4. REGULACIÓN**

Si se tiene en cuenta que todos los días del año se debe realizar la casación de la oferta y la demanda, es importante saber que no siempre el mercado va a actuar en unas condiciones de equilibrio. Por ello se tiene un sistema de ajuste para los desequilibrios que puedan ocasionarse y no hayan sido solucionados. Este sistema es controlado por el operador del sistema y su función es garantizar el suministro eléctrico en unas condiciones óptimas.

Dentro de este sistema de regulación existen diferentes niveles de actuación:

- Regulación Primaria: Controla las variaciones de la potencia de generación ante variaciones de frecuencia en el sistema. Es un servicio de carácter obligatorio y no retribuido. El tiempo de actuación de este tipo de regulación es como máximo de 30 segundos, y es aportada por medio de los reguladores de velocidad instalados en los generadores.
- Regulación Secundaria: La principal función es la de corregir desviaciones involuntarias de la operación en tiempo real y de continuar manteniendo el equilibrio entre generación y demanda. Actúa en el caso de que la regulación primaria no hubiera sido suficiente. El tiempo de actuación va desde los 30 segundos a 15 minutos. Para que pueda funcionar, el operador del sistema debe establecer todos los días una reserva secundaria que debe ser aportada por los generadores. Esta aportación es potestativa y se contempla dentro del marco de mercado, es decir, éstos presentan ofertas de potencia y se remunera tanto por la disponibilidad de potencia como por su uso en caso de regulación.

- Regulación Terciaria: Sustituye a la regulación secundaria en caso de que hubiera sido utilizada ante alguna falla del sistema, para que ésta pueda estar siempre disponible. Este mecanismo es de carácter potestativo y para todos los generadores que puedan ofrecerlo. Se remunera por medio de los mecanismos de mercado. El margen de tiempo en el cual podría ser requerido es desde los 15 minutos hasta un tiempo máximo de uso de 2 horas. La reserva terciaria se define como la máxima variación de potencia que una unidad generadora puede ofrecer en el tiempo de la regulación terciaria.

# **CAPÍTULO 5**

## **MODELO DE OPTIMIZACIÓN**

Una vez explicado el funcionamiento de las centrales termosolares y del mercado eléctrico español, se puede plantear el objetivo principal de este trabajo.

El objeto de este proyecto es optimizar la producción eléctrica en una central termosolar de concentradores cilindro parabólicos (CCP), utilizando un sistema de almacenamiento de sales. De esta manera se podrá almacenar energía en forma de calor para poder utilizarla en el momento más rentable para la central. Para saber qué momento es el propicio para inyectar potencia a la red y en cuál es más práctico almacenar la energía, se deberán tener en cuenta los precios del mercado diario eléctrico español.

A lo largo de este capítulo se expone un modelo en el que el objetivo es optimizar el rendimiento económico de la central a partir de la potencia de salida y obtener el mayor beneficio posible.

## 5.1. ECUACIONES DE LA PRIMERA APROXIMACIÓN

El funcionamiento de una central termosolar, simplificado a un nivel básico, es obtener toda la potencia solar disponible y verterla en el sistema eléctrico. Obviamente no es posible transformar toda la energía proveniente del sol en energía eléctrica, y como ya se ha explicado antes, cada tipo de tecnología tiene un rendimiento diferente.

Se supone un rendimiento para el bloque de la potencia de salida de un 35%.

$$\eta_o = 0.35$$

Este rendimiento no es el total de la planta, ya que para que fuera así deberíamos transformar el 35% de toda la potencia solar en el periodo de tiempo que se estudie, en este caso un año, en potencia eléctrica útil. Esto no es así debido a que la central tiene otros consumos de potencia a tener en cuenta como la potencia de calentamiento de las placas solares o la potencia de arranque de la central. Incluso se debe tener en cuenta que no siempre se puede aprovechar toda la potencia solar por las limitaciones físicas de la propia planta.

Existen dos ecuaciones principales en el problema:

- **Ecuación del Balance de Potencias:**

$$\frac{P_T(j)}{\eta_o} = P_{Solar}(j) + P_A^+(j) \cdot \eta_{sto} - P_A^-(j) - P_{spill}(j) - P_{startup}(j) - P_{warm}(j) \quad (\forall j \in J)$$

$P_T(j)$	=	Potencia de Salida del bloque de potencia [MWe]
$\eta_o$	=	Rendimiento del bloque de potencia para la potencia de salida
$P_{Solar}(j)$	=	Potencia Solar Incidente en los heliostatos [MWt]
$P_A^+(j)$	=	Potencia suministrada desde el almacenamiento [MWt]
$\eta_{sto}$	=	Rendimiento de Almacenamiento de la energía
$P_A^-(j)$	=	Potencia Almacenada desde el bloque de potencia [MWt]
$P_{spill}(j)$	=	Potencia desechada desde el bloque de potencia [MWt]
$P_{startup}(j)$	=	Potencia de arranque del bloque de potencia [MWt]
$P_{warm}(j)$	=	Potencia de calentamiento del campo solar [MWt]
$j$	=	Intervalo de tiempo medido, en este caso cada hora diaria [h]
$J$	=	Total de tiempo en el caso de estudio [h]



En esta ecuación se incluyen todos los términos de potencia que son utilizados de alguna manera en el proceso de transformación de la energía solar en energía eléctrica. La potencia solar producida ( $P_{\text{Solar}}(j)$ ) en el caso de estudio, el año 2014, se consigue de la aplicación *SAM*© (System Advisor Model) de NREL (National Renewable Energy Laboratory). En la zona de análisis del estudio, Sevilla, los datos de la radiación solar son, en general, bastante altos, ya que es una buena zona donde utilizar el recurso solar.

La potencia de calentamiento de las placas ( $P_{\text{warm}}(j)$ ) es la potencia que se necesita cada hora para alcanzar la energía de calentamiento necesaria en cada día para que comience a funcionar el campo solar. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\sum_{j \in W} P_{\text{warm}}(j) = E_{\text{warm}}$$

$P_{\text{warm}}(j)$	=	Potencia de calentamiento del campo solar [MWt]
$E_{\text{warm}}$	=	Energía necesaria de calentamiento del campo solar [MWth]
$j$	=	Intervalo de tiempo medido [h]
$W$	=	Total de tiempo necesario para conseguir la energía necesaria cada día [h]

La energía de calentamiento varía dependiendo del día del año. En las estaciones más frías la energía necesaria aumenta, ya que la variación de temperatura es mayor. La placa se encuentra más fría. Dado que no se dispone de los datos concretos para cada día del año del estudio, se puede realizar una aproximación bastante acertada para conseguir el dato necesario a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{E_{\text{warm}}}{E_{\text{solar día}}} = \frac{1}{\left( \frac{E_{\text{solar día}}}{\max(E_{\text{solar día}})} + 1 \right)^{13} + 0,0015}$$

$E_{\text{warm}}$	=	Energía necesaria de calentamiento del campo solar [MWth]
$E_{\text{solar día}}$	=	Energía solar total que se recoge en un día [MWth]

El término  $\frac{E_{\text{solar día}}}{\max(E_{\text{solar día}})}$  siempre será menor que uno o uno en el día que se consiga la máxima radiación solar. Así la aproximación que se obtiene se corresponde a que en el día más frío del año la energía de calentamiento necesaria sea mayor y en el día más caluroso la energía necesaria sea menor. Se asocia de esta manera la temperatura con la energía.

La potencia de arranque del bloque de potencia ( $P_{startup}(j)$ ) es la necesaria para poner en marcha todo el sistema de generación de la central. Los elementos como las sales térmicas del almacenamiento o el fluido caloportador pertinente necesitan una temperatura de arranque inicial para funcionar. El valor necesario en este tipo de plantas es:

$$P_{startup} = 60 \text{ MW}$$

Las variables  $P_A^+(j)$  y  $P_A^-(j)$  indican la potencia suministrada desde el almacenamiento y la potencia almacenada desde el bloque de potencia respectivamente. Cuando los precios de venta de la energía son bajos es preferible almacenarla para suministrarla en horas de precios más altos. El beneficio será mayor con el sistema de almacenamiento.

La potencia desechada desde el bloque de potencia ( $P_{spill}(j)$ ) es la potencia térmica sobrante que no se puede producir por las limitaciones de la planta (límite de potencia máxima producida), ni tampoco se puede almacenar porque el almacenamiento está lleno. Se debe intentar minimizar el valor de esta variable siempre que sea posible.

El resultado es finalmente la potencia total de salida del bloque ( $P_T(j)$ ) cedida a la red, en cada hora de funcionamiento de la planta durante un año. De esta manera se observan los dos casos posibles para producir: con almacenamiento y sin almacenamiento. En el caso del almacenamiento se incluye la función de optimización necesaria para hallar las horas menos rentables y aprovisionar energía en dicho periodo.

La segunda ecuación necesaria es:

- **Ecuación de Almacenamiento:**

$$E_A(j) = E_A(j-1) - \frac{P_A^+(j)}{\eta_{sto}} + \eta_{sto} \cdot P_A^-(j) \quad (\forall j \in J)$$

$E_A(j)$	=	Energía Almacenada en la hora $j$ [MWth]
$E_A(j-1)$	=	Energía Almacenada en la hora $j-1$ [MWth]
$P_A^+(j)$	=	Potencia suministrada al bloque de potencia [MWt]
$\eta_{sto}$	=	Rendimiento de Almacenamiento de la energía
$P_A^-(j)$	=	Potencia Almacenada desde el bloque de potencia [MWt]

El sistema de almacenamiento cede potencia cuando es necesario producir en una hora en concreto. Se debe tener en cuenta en cada hora la energía almacenada de la hora anterior y la potencia entregada al bloque de potencia o la potencia almacenada extra.

## 5.2. FUNCIÓN DE OPTIMIZACIÓN

El objetivo principal es buscar las horas de máximo beneficio para la producción de potencia eléctrica basándose en los precios horarios del mercado eléctrico. La función objetivo que expresa este fin es la siguiente:

$$\max \sum_{j \in J} [\pi_{DM}(j) \cdot P_T(j)] \quad (\forall j \in J)$$

$$\begin{aligned} P_T(j) &= \text{Potencia de Salida del bloque de potencia [MWe]} \\ \pi_{DM}(j) &= \text{Precios de la energía cada hora en el mercado diario [€/MWh]} \end{aligned}$$

Los precios de la energía vienen dados por el operador de sistema, Red Eléctrica de España, a través del sistema de información propio: ESIOS.

La potencia total ( $P_T(j)$ ) es hallada por la función de optimización basándose en las ecuaciones básicas del funcionamiento de la central ya descritas. De esta manera conseguimos maximizar la producción en las horas en las que los precios son mayores.

Con el programa para solucionar problemas lineales, **linprog**, del software *MatLab*, se consigue encontrar el mínimo para una función específica.

$$x = \text{linprog}(f, A, b, Aeq, beq, lb, ub)$$

La  $f$  se define como la función objetivo en la que basa la optimización. Debe ser una función lineal, ya que de otra manera no funcionaría. Como lo que se busca es el máximo, basta con cambiar el signo a la función definida,  $f$ , colocando un signo negativo anteriormente.

$A$  y  $b$  son las matrices de desigualdad en la que se incluyen las inecuaciones que se vayan a utilizar. En el caso de estudio se da la particularidad de que no existen inecuaciones y por tanto no son necesarias. Pero en MatLab hay que definir las, aunque

estén vacías. Las Matrices  $A_{eq}$  y  $b_{eq}$  son las que definen las ecuaciones de igualdad. Aquí se incluyen las ecuaciones básicas ya mencionadas.

Los dos últimos términos,  $lb$  y  $ub$ , son los límites inferiores y superiores respectivamente de cada variable. La solución debe quedar siempre dentro de dichos límites.

$$lb \leq x \leq ub$$

Por último, comentar que  $x$  es la solución óptima encontrada. En este vector se encuentran los valores optimizados de todas las variables que hemos introducido.

### 5.3. VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS

Como se ha explicado anteriormente, la central tiene una capacidad de producción limitada, es decir, una potencia máxima que puede suministrar. En el almacenamiento existe la misma limitación. En ambos casos no se va a considerar límites inferiores por motivos de simplificación, pero en el caso del almacenamiento esto no podría ocurrir. Es necesario mantener las sales a una temperatura determinada para evitar su solidificación.

En esta tabla se detallan los límites:

Variable	Límite Superior (ub)	Límite Inferior (lb)
$P_T(j)$	100 (MW)	0 (MW)
$P_A^+(j)$	100 (MW)	0 (MW)
$P_A^-(j)$	100 (MW)	0 (MW)
$P_{spill}(j)$	Sin Límite	0 (MW)
$E_A(j)$	100 (MW)	0 (MW)

Tabla 1. Mínimos y Máximos de las Variables.  
[Elaboración Propia]

# CAPÍTULO 6

## RESULTADOS

En este apartado se expondrán varios ejemplos del modelo para realizar una comparación entre todos. Al tratarse de un problema de mejora del beneficio, se realizan dos hipótesis:

La primera es la venta de la energía sin tener en cuenta un sistema de almacenamiento, y por tanto vendiendo el máximo de energía posible con el precio estipulado en ese momento.

La segunda trata de optimizar la venta de dicha energía con un sistema de almacenamiento, en el cual se guarda el recurso necesario para comercializarlo cuando los precios sean más altos.

## 6.1. CASO SIN ALMACENAMIENTO

En este primer caso se evalúa la producción de potencia con el recurso solar disponible, sin tener opción a nada más. Esto significa que solo se va a producir hasta la capacidad máxima de la planta. El resto de la potencia que se recoge (Potencia solar térmica) se desecha.

En este caso, la producción de salida del bloque de potencia se encuentra dentro de las horas en las que se tiene recurso solar. Se van a analizar dos periodos diferentes: verano e invierno. Se recoge como muestra tres días tipo de cada uno de los casos.

### 6.1.1. PERIODO DE INVIERNO

En el caso de los días de invierno, la gráfica a continuación muestra la variación en 72 horas de la producción solar, la potencia de salida y el precio de la energía cada hora.

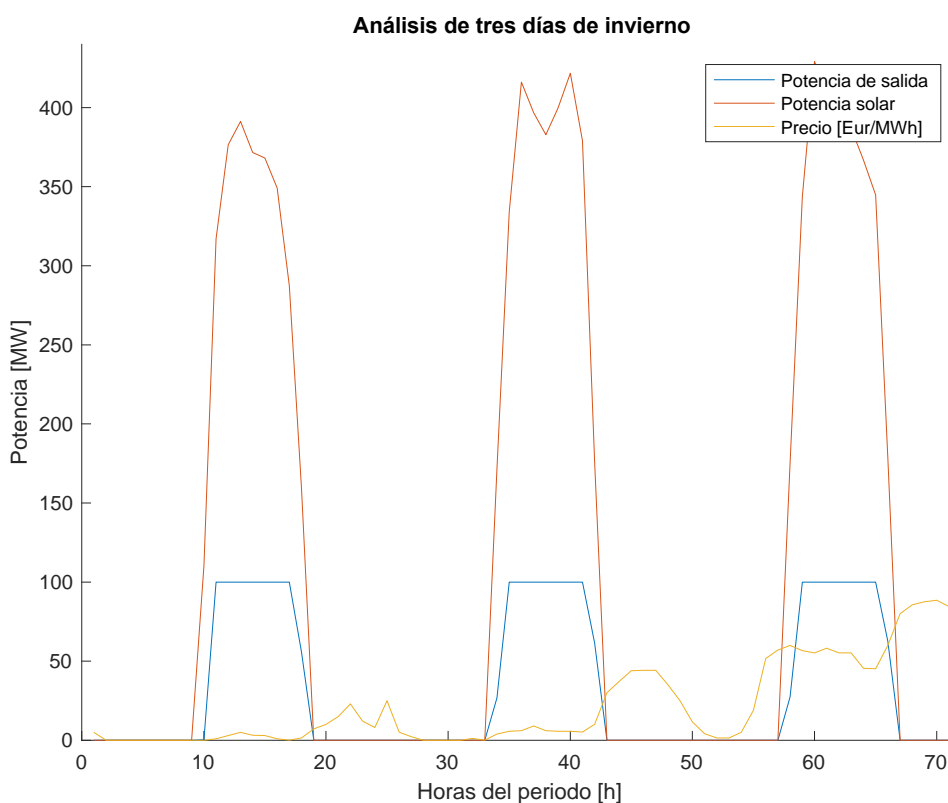


Figura 54. Gráfica de tres días típicos de invierno  
[Fuente MatLab]

Como se puede apreciar, el precio no afecta a la producción de potencia, ya que el único elemento que afecta a la producción de la central es el recurso solar. En cualquier caso, se tienen en cuenta todas las variables de consumo de la central.

La  $P_T$  se encuentra en todo momento dentro del área de  $P_{solar}$ .

### 6.1.2. PERIODO DE VERANO

Igual que en el caso de los días de invierno la aplicación muestra los datos de tres días de verano típicos con las mismas variables.

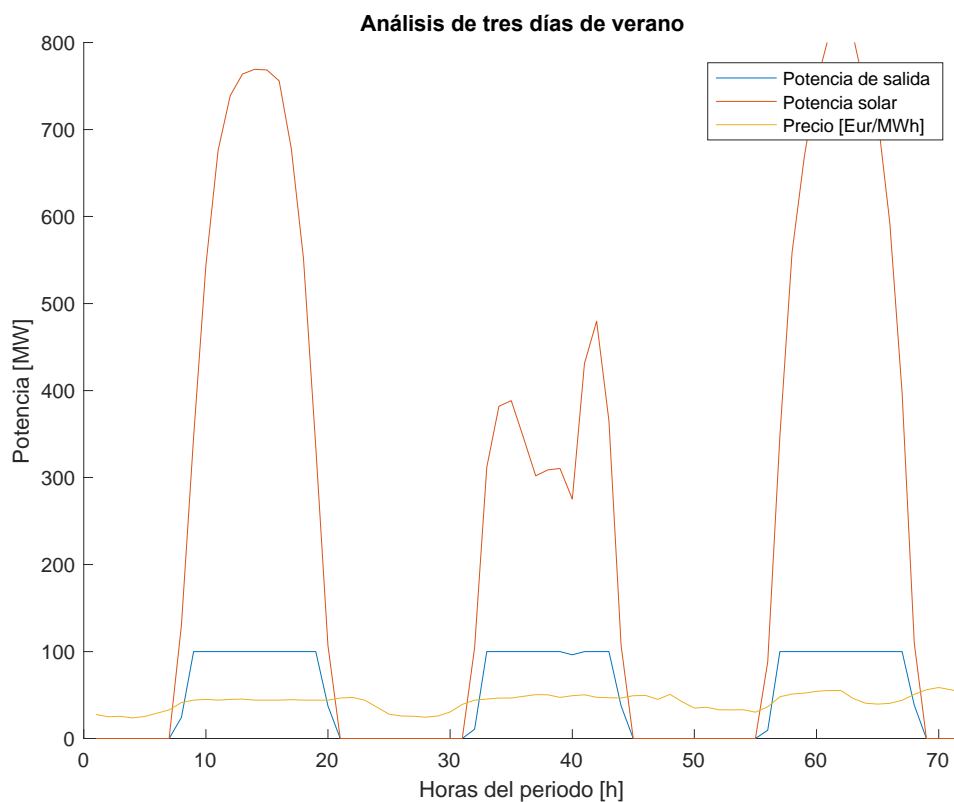


Figura 55. Gráfica de tres días típicos de verano  
[Fuente MatLab]

Durante la época de verano, como es lógico, el recurso solar es mucho mayor, llegando incluso a duplicar la potencia que se puede captar. Por desgracia si nuestra planta tiene una capacidad de producción limitada, no se puede ampliar la potencia entregada.

El hecho de que no exista el almacenamiento hace que no se pueda aprovechar el enorme recurso solar que existe en esta época.



Otra diferencia notable es que en esta época del año los precios se normalizan sin que existan picos en determinadas horas.

### 6.1.3. BENEFICIO ACUMULADO

El beneficio recaudado a lo largo de todo el año es el producto de la potencia suministrada cada hora del día por el precio que se estipuló para dicha hora. Al final del periodo conseguimos el beneficio bruto que obtiene la central termosolar.

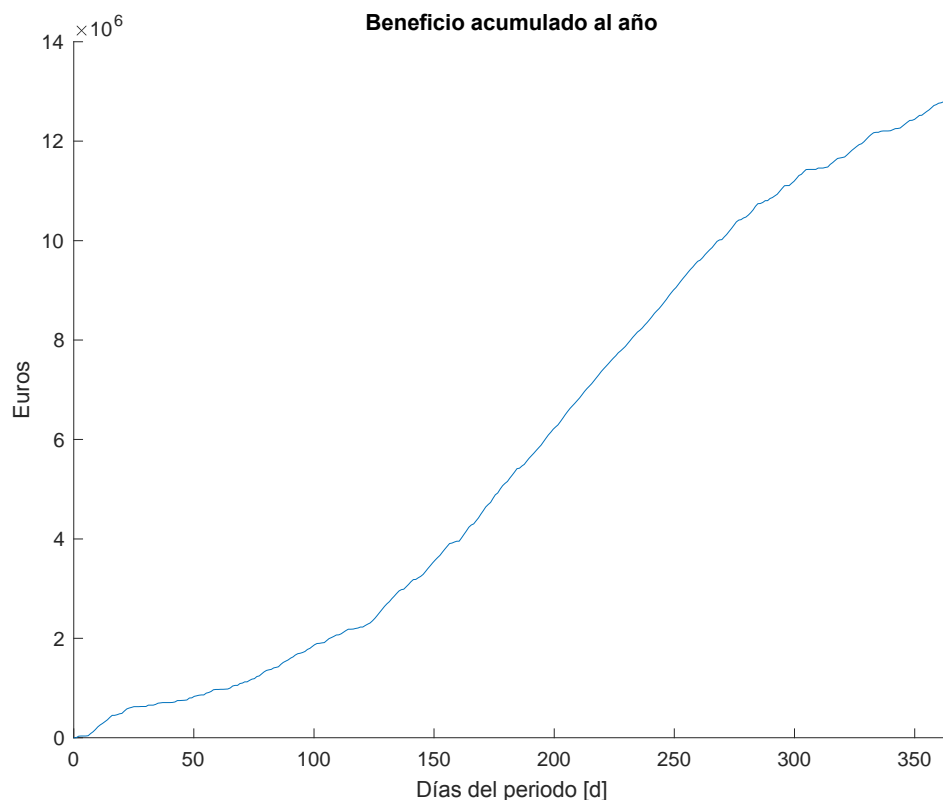


Figura 56. Beneficio Acumulado en un año sin almacenamiento  
[Fuente MatLab]

En la gráfica se muestra el incremento del beneficio según avanzan los días. El beneficio total bruto acumulado es de **12.921.052,80 €**

## 6.2. CASO CON ALMACENAMIENTO

Cuando se incluye el almacenamiento, se crea la posibilidad de poder producir potencia cuando ya no hay radiación solar. La energía térmica almacenada en las sales fundidas hace que pueda funcionar el ciclo de vapor del bloque de potencia, generando así energía eléctrica.

Igual que en el caso anterior se realiza un estudio de dos estaciones diferentes, ya que la climatología es diferente. Tomamos tres días de invierno y tres días de verano.

### 6.2.1. PERIODO DE INVIERNO

Utilizando la función *Linprog* que permite realizar la optimización de la potencia de salida, obtenemos la siguiente gráfica que muestra las mismas variables que el caso sin almacenamiento, añadiendo la energía que se almacena en todo momento.

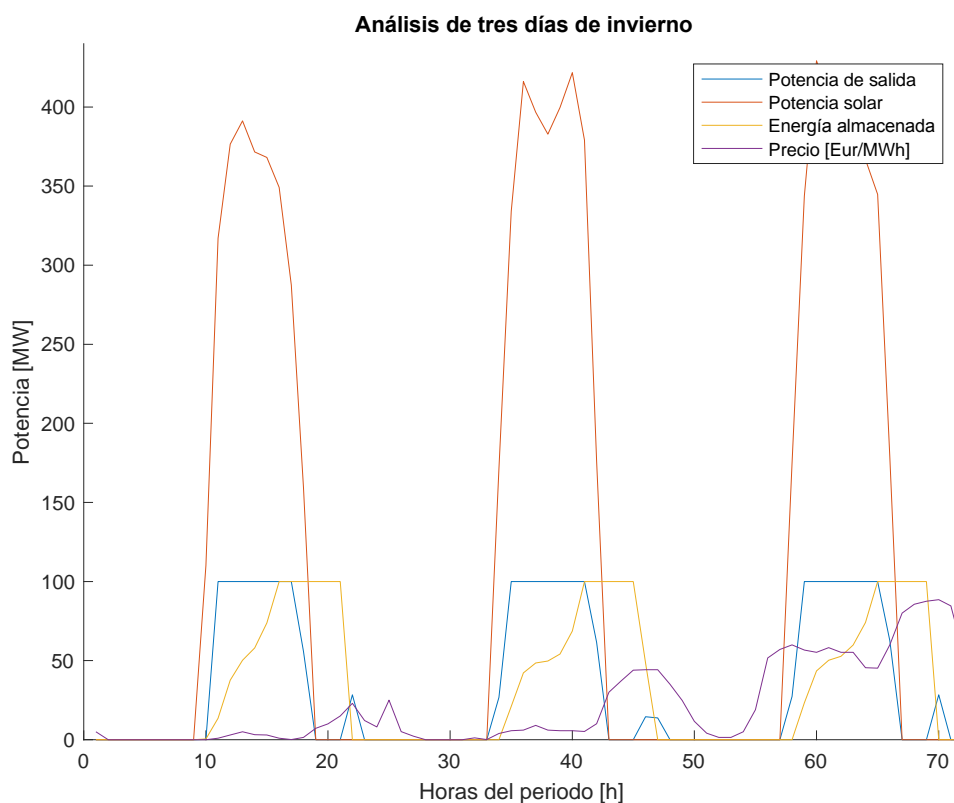


Figura 57. Gráfica de tres días típicos de invierno con almacenamiento  
[Fuente MatLab]

La potencia de salida durante las horas del recurso solar apenas varía con respecto al sistema sin almacenamiento. La ventaja que se obtiene es que, durante esa franja de tiempo, se almacena energía hasta llegar a su capacidad máxima en casi todos los días. Más tarde cuando los precios son más altos se utiliza dicha energía.

Se puede observar en la gráfica que, en los picos de precios, si queda energía almacenada, produce potencia.

### 6.2.2. PERIODO DE VERANO

Se toma la muestra de tres días del periodo estival para analizar las curvas de la misma manera.

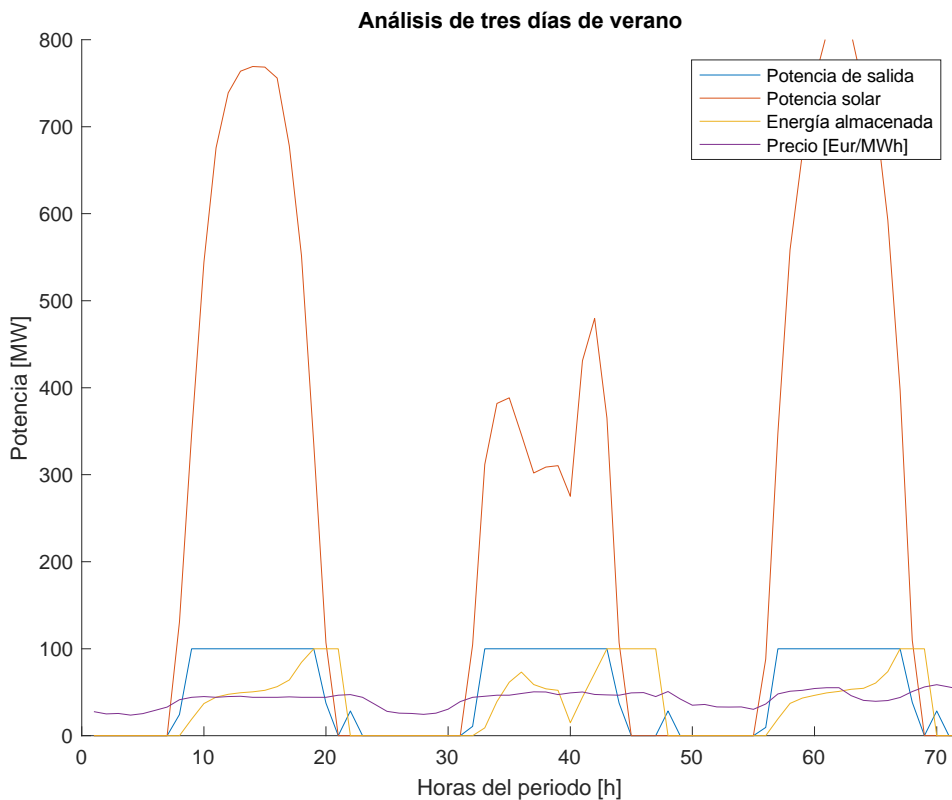


Figura 58. Gráfica de tres días típicos de verano con almacenamiento  
[Fuente MatLab]

Como se comenta en el caso sin almacenamiento, el recurso solar es mayor y los precios son más estables que en los meses de invierno. El almacenamiento se usa en los casos que la producción disminuye, como se puede observar en el segundo día en la hora 40. La radiación disminuye por la climatología y la potencia generada es menor. Entonces entra en juego la energía recolectada en las horas anteriores.

Esto se produce porque los precios son más altos, dentro de la poca variación que tienen, que el resto de las horas.

El funcionamiento con almacenamiento es buscar las horas de máximo beneficio y generar en esa franja. Si no se tiene recurso solar, se usa la energía térmica almacenada en las sales.

### 6.2.3. BENEFICIO ACUMULADO

La forma de saber si el almacenamiento es rentable a largo plazo es saber el beneficio recaudado. Como se explica anteriormente, es el producto de la potencia suministrada cada hora del día por el precio que se estipuló para dicha hora. Como en este caso podemos producir en un espacio temporal mayor, el beneficio también será mayor.

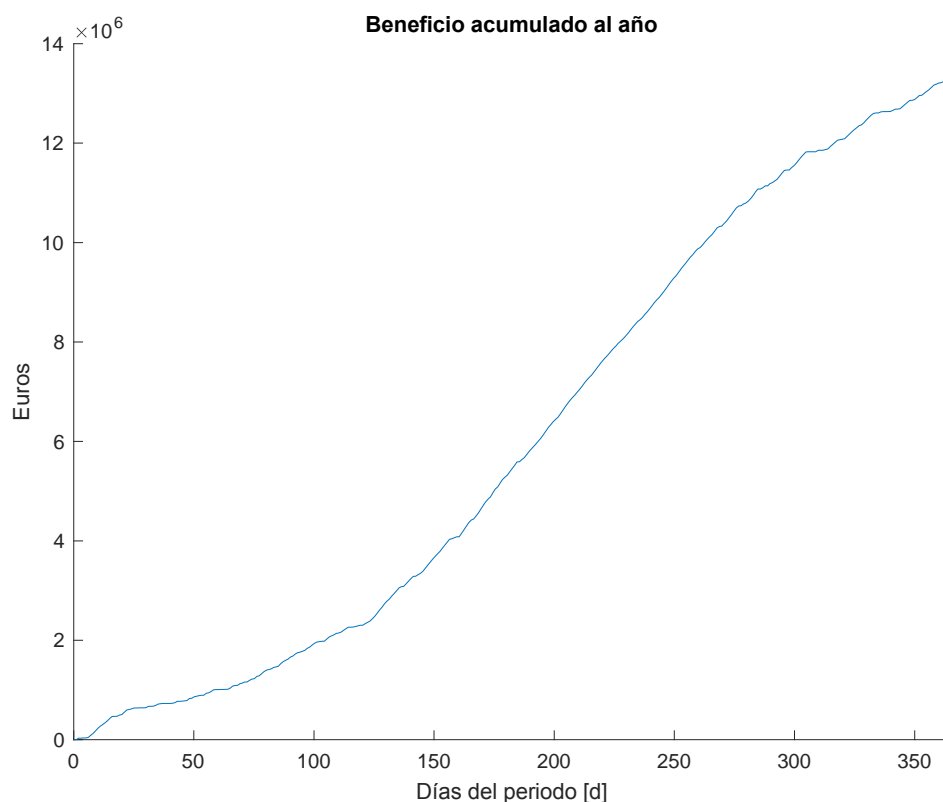


Figura 59. Beneficio Acumulado en un año con almacenamiento  
[Fuente MatLab]

El beneficio total bruto con el sistema de almacenamiento es de **13.973.458,59 €**. La diferencia con respecto a un sistema sin almacenamiento es de **1.052.405.79 €** anuales. La siguiente pregunta a contestar es si este sistema es rentable.

### 6.3. COSTES DE INVERSIÓN

Los costes de inversión varían en función de la tecnología instalada y de la potencia de la planta.

Tipo de Tecnología	Coste de Inversión (Millones €/ MW)
Torre con Almacenamiento	12,2
<b>Torre sin Almacenamiento</b>	<b>9</b>
CCP con Almacenamiento	6,5
<b>CCP sin Almacenamiento</b>	<b>6,3</b>
Colectores Lineales Fresnel	5,9
<b>Disco Parabólico</b>	<b>14</b>

Tabla 2. Coste de inversión de diferentes tecnologías. Fuente IDAE  
[60]

La tabla muestra los costes de inversión por megavatio instalado para cada tecnología. Es necesario apuntar que los costes asociados por cada MW descienden cuanto mayor es la potencia instalada. Se observa que los costes son mayores cuando la planta tiene almacenamiento. Por el contrario, las centrales que tienen instalado el almacenamiento pueden aumentar sus horas de funcionamiento considerablemente, y de esta manera, aumentan sus ingresos.

Los costes de inversiones se reparten en los siguientes sistemas de la central

- Campo de heliostatos, con los sistemas captadores completos.
- Sistema receptor, que varía dependiendo de la tecnología.
- Bloque de Potencia
- Construcción de la planta incluyendo todas las pruebas de los equipos y puesta en marcha. Además del coste del terreno e impuestos.
- Costes de proyecto de ingeniería.
- Almacenamiento y sales en el caso que lo hubiera.

## 6.4. RENTABILIDAD

En el caso de estudio, la diferencia entre tener almacenamiento y optimizar las operaciones, a por el contrario producir únicamente con el recurso solar sin almacenamiento, es de un importe anual de **1.052.405.79 €**.

Según los costes de inversión reportados por IDAE, el presupuesto para una central CCP con almacenamiento es de **6,5 M€**. El coste para una central CCP sin sistema de almacenamiento es de **6,3 M€**.

Si la vida útil de este tipo de centrales termosolares está entre los 25-30 años [61], se puede hallar cuál es la rentabilidad de un sistema de almacenamiento.

## ESTUDIO COMPARATIVA ENTRE TECNOLOGÍAS PARA UNA PLANTA DE 100 MW

	Años							
	-1	1	2	3	4	5	6	7
Central CCP sin Almacenamiento	-630.000.000,00 €	12.921.052,80 €	12.921.053,80 €	12.921.054,80 €	12.921.055,80 €	12.921.056,80 €	12.921.057,80 €	12.921.058,80 €
Central CCP con Almacenamiento	-650.000.000,00 €	13.973.458,59 €	13.973.459,59 €	13.973.460,59 €	13.973.461,59 €	13.973.462,59 €	13.973.463,59 €	13.973.464,59 €
Diferencia	-20.000.000,00 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €
Acumulado	-20.000.000,00 €	-18.947.594,21 €	-17.895.188,42 €	-16.842.782,63 €	-15.790.376,84 €	-14.737.971,05 €	-13.685.565,26 €	-12.633.159,47 €

	8	9	10	11	12	13	14	15
Central CCP sin Almacenamiento	12.921.059,80 €	12.921.060,80 €	12.921.061,80 €	12.921.062,80 €	12.921.063,80 €	12.921.064,80 €	12.921.065,80 €	12.921.066,80 €
Central CCP con Almacenamiento	13.973.465,59 €	13.973.466,59 €	13.973.467,59 €	13.973.468,59 €	13.973.469,59 €	13.973.470,59 €	13.973.471,59 €	13.973.472,59 €
Diferencia	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €
Acumulado	-11.580.753,68 €	-10.528.347,89 €	-9.475.942,10 €	-8.423.536,31 €	-7.371.130,52 €	-6.318.724,73 €	-5.266.318,94 €	-4.213.913,15 €

	16	17	18	19	20	21	22	23
Central CCP sin Almacenamiento	12.921.067,80 €	12.921.068,80 €	12.921.069,80 €	12.921.070,80 €	12.921.071,80 €	12.921.072,80 €	12.921.073,80 €	12.921.074,80 €
Central CCP con Almacenamiento	13.973.473,59 €	13.973.474,59 €	13.973.475,59 €	13.973.476,59 €	13.973.477,59 €	13.973.478,59 €	13.973.479,59 €	13.973.480,59 €
Diferencia	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €
Acumulado	-3.161.507,36 €	-2.109.101,57 €	-1.056.695,78 €	-4.289,99 €	1.048.115,80 €	2.100.521,59 €	3.152.927,38 €	4.205.333,17 €



	24	25
<b>Central CCP sin Almacenamiento</b>	12.921.075,80 €	12.921.076,80 €
<b>Central CCP con Almacenamiento</b>	13.973.481,59 €	13.973.482,59 €
<b>Diferencia</b>	1.052.405,79 €	1.052.405,79 €
<b>Acumulado</b>	5.257.738,96 €	6.310.144,75 €

Tabla 3. Análisis Económico de una central CCP con y sin almacenamiento.

Con los datos económicos de los que se dispone, se puede decir que hasta el **año 20** de funcionamiento de una central CCP con almacenamiento, no se amortizaría dicho sistema.

Si se tiene en cuenta que la vida útil de los elementos de la central debería superar los 25 años se puede afirmar que es una buena inversión.

Otro punto importante es saber que los precios de la energía irán aumentando cada año y que seguramente el retorno de la inversión vendrá mucho antes.

Un sistema de estas características para una planta de 100 MW tendría unos costes de inversión de unos **21.048.115,8 €**.

# CAPÍTULO 7

## MEJORAS A IMPLEMENTAR

El modelo de optimización usado está restringido por las variables utilizadas. El programa se podría mejorar teniendo en cuenta un mayor número de variables implementadas en más ecuaciones.

La complicación aumenta cuando se intenta perfeccionar la función objetivo y las ecuaciones que entrañan el funcionamiento de la central. Se añaden variables que no se han tenido en cuenta como por ejemplo la potencia de la planta que se toma de la red en algunos casos o las pérdidas de energía que existe en el almacenamiento.

Además, se puede intentar implementar el uso de variables binarias para evitar situaciones incoherentes, como por ejemplo que la planta arranque a la vez que se apaga, algo que no tiene sentido y es imposible.

Otra mejora más simple sería estudiar los diferentes rendimientos que existen en la función de almacenaje y de desalmacenaje. Se toma un valor estándar para un sistema de almacenamiento, pero se necesitaría un estudio más profundo para definir unos rendimientos reales.

Las ecuaciones y la función objetivo con las nuevas variables serían las siguientes:

## 7.1. ECUACIONES INCLUYENDO LA MEJORA

### Función Objetivo:

$$\max \sum_{j \in J} [\pi_{DM}(j) \cdot P_T(j) - \pi_{DM}(j) \cdot P_{grid}(j)] \quad (1)$$

### Balance de Potencias:

$$\frac{P_T(j)}{\eta_o} = P_{Solar}(j) + P_A^+(j) \cdot \eta_{sto} - P_A^-(j) - P_{spill}(j) - P_{startup}(j) - P_{warm}(j) \quad (\forall j \in J) \quad (2)$$

$$\sum_{j \in W} P_{warm}(j) = E_{warm} \quad (3)$$

$$P_{startup}(j) = y(j) \cdot P_{startup}^{sp} \quad (\forall j \in J) \quad (4)$$

$$v(j) \cdot P_T^{min} \leq P_T(j) \leq v(j) \cdot P_T^{max} \quad (\forall j \in J) \quad (5)$$

$$P_{grid}(j) = P_{self}(j) \cdot (1 - v(j)) \quad (\forall j \in J) \quad (6)$$

### Almacenamiento

$$E_A(j) = E_A(j-1) - \frac{P_A^+(j)}{\eta_{sto}} + \eta_{sto} \cdot P_A^-(j) - \Delta P_A^{loss} \quad (\forall j \in J) \quad (7)$$

$$E_A(j) \geq E_A^{min} \quad (\forall j \in J) \quad (8)$$

## **Variables**

$\pi_{DM}(j)$	=	Precios de la energía cada hora en el mercado diario [€/MWh]
$P_T(j)$	=	Potencia de Salida del bloque de potencia [MWe]
$P_{grid}(j)$	=	Potencia consumida de la red [MWe]
$\eta_o$	=	Rendimiento del bloque de potencia para la potencia de salida
$\eta_{sto}$	=	Rendimiento del almacenamiento
$P_{Solar}(j)$	=	Potencia Solar Incidente en los heliostatos [MWt]
$P_A^+(j)$	=	Potencia suministrada desde el almacenamiento [MWt]
$\eta_{sto}$	=	Rendimiento de Almacenamiento de la energía
$P_A^-(j)$	=	Potencia Almacenada desde el bloque de potencia [MWt]
$P_{spill}(j)$	=	Potencia desechada desde el bloque de potencia [MWt]
$P_{startup}(j)$	=	Potencia de arranque del bloque de potencia [MWt]
$P_{warm}(j)$	=	Potencia de calentamiento del campo solar [MWt]
$E_{warm}$	=	Energía necesaria de calentamiento del campo solar [MWth]
$E_A(j)$	=	Energía Almacenada en la hora j [MWth]
$E_A(j - 1)$	=	Energía Almacenada en la hora j - 1 [MWth]
$E_A^{min}$	=	Energía de almacenamiento mínima [MWth]
$P_{startup}^{sp}$	=	Potencia requerida para arrancar la planta [MWt]
$p_T^{max}$	=	Potencia Máxima de producción de la planta [MWe]
$p_T^{min}$	=	Potencia Mínima de producción de la planta (0) [MWe]
$P_{self}(j)$	=	Potencia que consume la planta en las horas de no funcionamiento [MWe]
$\Delta P_A^{loss}$	=	Variación de Potencia debido a las pérdidas en el almacenamiento [MWt]
$j$	=	Intervalo de tiempo medido, en este caso cada hora diaria [h]
$J$	=	Total de tiempo en el caso de estudio [h]
$v(j)$	=	Variable Binaria (0/1) de funcionamiento de la planta
$y(j)$	=	Variable Binaria (0/1) que indica si la planta está arrancando.

## 7.2. EXPLICACIÓN DE LA MEJORA DEL MODELO

Lo primero que cabe destacar es que, en la función objetivo, se incluye un término nuevo,  $P_{grid}(j)$  multiplicado por el precio diario. Este nuevo factor es el que determina el gasto económico que tiene la planta por la energía que consume de la red.

El gasto de energía que tiene la planta se produce en el momento que no existe recurso solar y la energía contenida en el almacenamiento es insuficiente para mantener el calor de las sales. En este caso se recurre a la energía de la red. Esto solo sucede cuando la planta no está en funcionamiento (no recibe y procesa la radiación solar). Este suceso queda formulado en la ecuación (6).

En la ecuación (6) tenemos una variable binaria,  $v(j)$ . Solo puede tomar los valores de 0 y 1. Esta variable se utiliza para definir el estado de funcionamiento de la central. Si es 0 la planta está en estado de reposo; si es 1 la planta funciona. Aplicado a la ecuación (6), si la variable toma el valor de 1 (encendida), entonces la potencia consumida de la red es 0.

Esta variable binaria es utilizada también en la inecuación (5), en donde se definen los límites superior e inferior de la potencia total, pero con la peculiaridad de que solo tengan efecto cuando la planta esté en funcionamiento. De esta manera resulta más real la limitación, aunque lo lógico es que el límite inferior siempre sea cero en este tipo de centrales.

El balance de potencias queda conformado con las mismas variables, y el funcionamiento es el mismo.

La diferencia estaría en el valor que toma la potencia de arranque de la planta,  $P_{startup}(j)$ , definida ahora por el producto de la variable binaria,  $y(j)$ , y el valor de dicha potencia,  $P_{startup}^{sp}$ . El valor de esta potencia es el mismo, pero actúa  $y(j)$  para informar de si la central está en el proceso de arranque o no. La variable toma el valor de 1 si es así y 0 si no lo es.

Por último, se añade a la ecuación (7) que define el almacenamiento, la variación de potencia que se produce en su interior debido a las pérdidas de calor,  $\Delta P_A^{loss}$ . Dichas pérdidas han sido estudiadas y responden a un complejo sistema de ecuaciones de transferencia de calor, que resolviéndolo da un valor de la potencia que se disipa.

Además, se tiene en cuenta en la ecuación (8) que las sales fundidas necesitan un valor mínimo de energía almacenada para no solidificarse, ya que perderían sus propiedades caloportadoras.

### **7.3. MODELO PREDICTIVO**

En el modelo actual de optimización, los datos obtenidos son a año pasado, tanto en recurso solar como en precios de la energía.

Otra mejora que se podría estudiar es trasladar todo este estudio a un modelo que fuera capaz de predecir los datos necesarios para un uso a futuros. Los datos necesarios se podrían calcular de manera que la optimización fuera más precisa.

El recurso solar es cambiante debido a la meteorología, pero existen zonas en el planeta donde la variación es mínima; el tiempo meteorológico es bastante estable.

Los precios pueden variar en los mercados intradiarios, pero se pueden obtener y calcular en qué momento es más propicio producir.

Si fuera posible implementar un sistema que recogiera los datos y los actualizara constantemente, se podría crear un sistema de optimización muy rentable.

# **CAPÍTULO 8**

## **CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES**

Se ha tardado en elaborar esta memoria aproximadamente unos seis meses. Por desgracia no ha sido posible destinar todo este tiempo al trabajo, ya que el autor ha estado y sigue contratado en una empresa.

Las actividades abajo descritas han seguido un orden de elaboración definido por la necesidad del proyecto.



Tarea	Inicio (semana)	Duración (semanas)	Fin (semana)
<b>Búsqueda y Análisis de la Información</b>	0	22	22
<b>Diseño y Redacción del Capítulo 1</b>	22	2	24
<b>Diseño y Redacción del Capítulo 2</b>	4	2	6
<b>Diseño y Redacción del Capítulo 3</b>	6	3	9
<b>Diseño y Redacción del Capítulo 4</b>	9	2	11
<b>Toma de Datos para la Aplicación</b>	11	1	12
<b>Obtención de Datos de SAM</b>	11	1	12
<b>Realización de la Aplicación en MatLab</b>	12	9	21
<b>Diseño y Redacción del Capítulo 5</b>	14	7	21
<b>Diseño y Redacción del Capítulo 6</b>	19	2	21
<b>Diseño y Redacción del Capítulo 7</b>	21	1	22
<b>Diseño y Redacción del Capítulo 8</b>	23	1	24
<b>Diseño y Redacción del Capítulo 9</b>	22	1	23
<b>Revisión de la memoria</b>	24	1	25
<b>Varios</b>	24	1	25

Tabla 4. Tareas realizadas en la elaboración de la memoria  
[Elaboración propia]

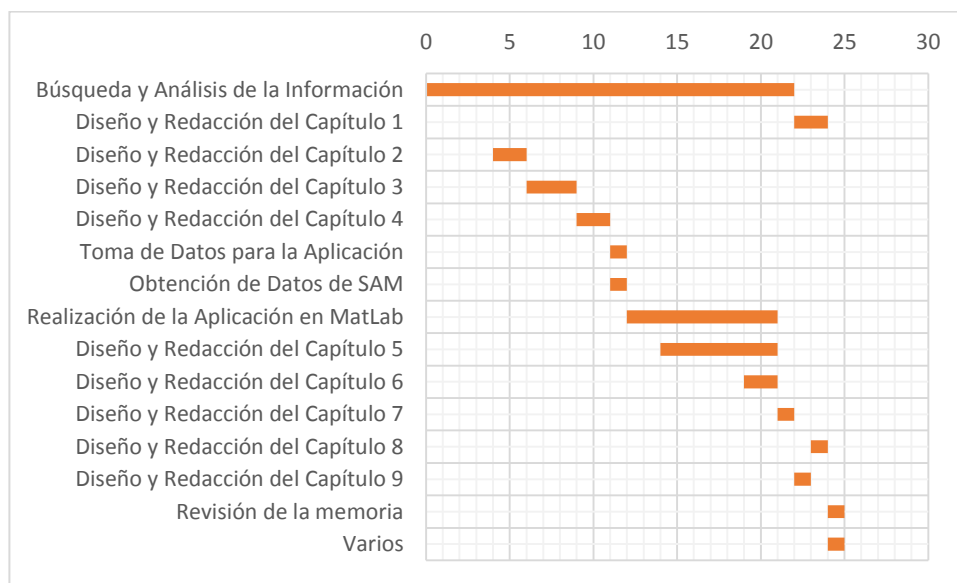


Tabla 5. Diagrama de Gantt con la duración del Trabajo de Fin de Grado  
[Elaboración propia]

# CAPÍTULO 9

## CONCLUSIONES

En este apartado concluye el desarrollo de la memoria de este proyecto. Después de haber hecho una pequeña descripción del sistema eléctrico, las tecnologías de generación que forman parte de éste y el mercado eléctrico español, se ha descrito el modelo de optimización, el cual es el objeto de este trabajo. También se proponen mejoras que se podrían implementar en el programa para poder crear una simulación lo más real posible.

Durante este trabajo de fin de grado se ha creado un programa en el software MatLab© que es capaz de decir cuándo es más rentable para la central producir potencia e inyectarla en la red y cuándo merece la pena almacenar dicha energía y producir más adelante. Gracias a las propiedades de las sales fundidas del almacenamiento, que son capaces de retener el calor durante varias horas, es posible.

Se realiza un estudio de diferentes días en distintas épocas del año para ver su efecto. Se aprecia mayor recurso solar en la estación estival, pero a su vez una mayor estabilidad en los precios horarios. Sin embargo, en invierno los precios son más inestables, ya que las energías renovables tienen una variación de producción más alta, debido a la climatología. En el estudio se puede comprobar que la optimización es efectiva, ya que cuando la curva de los precios tiene máximos relativos, la producción es mayor.

Las mejoras propuestas en esta memoria sobre el modelo de optimización se pueden llegar a implementar con más tiempo y realizando un estudio de todas las variables que afectan a una central de las características propuesta.

La conclusión que se puede sacar del modelo explicado es que, con un sistema de almacenamiento, se puede mejorar el rendimiento económico que tiene una planta termosolar.

Durante el proyecto se han realizado numerosas simplificaciones debido a la complejidad del cálculo que entrañaban algunos apartados. Este trabajo se podría desarrollar siguiendo la misma dirección, hasta alcanzar un modelo que fuera realista y que realmente fuera beneficioso para una central termosolar, incluyendo todos los inconvenientes que pudieran surgir.

De manera personal el trabajo me ha ayudado a tener una percepción global más amplia de la tecnología existente y de su funcionamiento, en especial de las centrales termosolares. Durante los últimos cursos del grado en ingeniería eléctrica se alcanzan los conocimientos necesarios para poder desarrollar un trabajo de fin de grado como este.

Además, la búsqueda de la información y la programación del modelo me han ayudado a tener una base muy importante de cara al futuro, que espero poder volver a usar.

# ANEXOS

## CODIGO DE PROGRAMACIÓN DE LA APLICACIÓN REALIZADA EN MATLAB

### Programa\_Calculo\_v01.m

```
%%TFGALVAROPEÑALVERMARTÍN code for ALVAROPEÑALVERMARTÍN in
%%'Programa_Calculo_v01.m' and 'Programa_Calculo_Sin_Optimizacion.m'

%% Reset de variables

clc; clear all; format bank;

%% Inicialización de Términos Independientes

T = 365;

% Pot.solar
pot_solar = xlsread('SOLAR.xlsx',1,'B2:B9000');
pot_solar_ordenado = reshape(pot_solar,[24,T]);

% Precios Diarios de la Energía
precios = xlsread('Precios Mercado.xlsx',1,'E3:E9000');
precios_ordenado = reshape(precios,[24,T]);

% Cálculo de la Ewarm para cada uno de los días

Ewarm = zeros(1,365);
max_pot_solar = max(sum(pot_solar_ordenado)); %máximo de la suma de las potencias (energías)
solares de todo el día

for i = 1:365

    Ewarm_calculo =
    sum(pot_solar_ordenado(:,i))/((((sum(pot_solar_ordenado(:,i))/max_pot_solar)+1)^13)+0.0015);
    Ewarm(1,i) = Ewarm_calculo;

end

% Potencia de Arranque Pstartup

Estartup = 60;
```

```

%% Sacar Valores

final = ones(1,5);

% Resultados para todo el año
for dias = 1:T % Bucle para coger todos los días

Psolar = pot_solar_ordenado (1:24,dias); % Datos de la potencia solar en un día.

Precios = precios_ordenado (1:24,dias); % Precios Diarios en un día.

Ewarmdia = Ewarm (1,dias); % Energía de Calentamiento de un día.

% Ecuación para Pwarm y Pstartup
contador = 0;
contador2 = 0;
Pwarm = zeros(24,1);
Pstartup = zeros(24,1);

for j = 1:24
    if contador < Ewarmdia
        contador = contador + Psolar(j,1);
        Pwarm(j,1) = Psolar(j,1);
        if contador > Ewarmdia
            Pwarm(j,1) = Psolar(j,1) - contador + Ewarmdia;
        end
    end
    if contador > Ewarmdia && contador2 < Estartup
        contador2 = contador2 + Psolar(j,1);
        Pstartup(j,1) = Psolar(j,1)-Pwarm(j,1);
        if contador2 > Estartup
            Pstartup(j,1) = Psolar(j,1) -contador2 + Estartup;
        end
    end
end

% Ecuaciones de la Linealización

%Ecuación de balance de potencias con Pt , Paplus, Paminus, Pspill, Ea

%Ecuación Pt
Rendimiento = 0.35;

Ec1_Pt = eye(24)/Rendimiento;

%Ecuación Pa+
Rendimiento_Almacenamiento = 0.9;

Ec1_Papulus = eye(24)*(-Rendimiento_Almacenamiento);

%Ecuación Pa-
Ec1_Paminus = eye(24);

%Ecuación Pspill
Ec1_Pspill = eye(24);

%Ecuación Ea
Ec1_Ea = zeros(24);

%Ecuación de Almacenamiento con Pt , Paplus, Paminus, Pspill, Ea

%Ecuación 2 Pt
Ec2_Pt = zeros(24);

%Ecuación 2 Pa+
Rendimiento_Almacenamiento = 0.9;

Ec2_Papulus = eye(24)/(Rendimiento_Almacenamiento);

```

```

%Ecuación 2 Pa-
Rendimiento_Almacenamiento = 0.9;

Ec2_Paminus = eye(24)*(-Rendimiento_Almacenamiento);

%Ecuación 2 Pspill
Ec2_Pspill = zeros(24);

%Ecuación 2 Ea
Ec2_Ea = eye(24);

for j = 2:24
    Ec2_Ea(j,j-1) = -1;
end

% Matriz de Resultados
Matriz_A = [Ec1_Pt Ec1_Papulus Ec1_Paminus Ec1_Pspill Ec1_Ea;
            Ec2_Pt Ec2_Papulus Ec2_Paminus Ec2_Pspill Ec2_Ea];

%Términos Independientes
TI = [Psolar - Pwarm - Pstartup; zeros(24,1)];

% Optimización de Potencia
% El objetivo es maximizar la función de SUMATORIO[Precio(j)*Pt(j)-Precio(j)*Pgrid(j)]

A = [ ];
b = [ ];
Aeq = Matriz_A;
beq = TI;
lb = zeros(1,120);
ub = [100*ones(1,24) , 100*ones(1,24) , 100*ones(1,24) , inf(1,24) , 100*ones(1,24)];

f = [Precios' zeros(1,24) zeros(1,24) zeros(1,24) zeros(1,24)];

x = linprog(-f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);

x_ordenado = reshape(x,[24,5]);

final = [final; x_ordenado]; %Matriz de resultados final

warning('off','all');

end % Final del buque de los dias

final(1,:)=[]; %Matriz de resultados final sin la fila de ceros
PTfinal = reshape(final(:,1),[24,T]); %Potencia total final
EAFinal = reshape(final(:,5),[24,T]); %Energía almacenada final

acumulado = final(:,1).*precios;
inicio = 0;

for i = 0:T-1
    acumulado_dia = sum(acumulado(1+24*i:24*(i+1),1));
    inicio = [inicio;acumulado_dia];
end

%inicio(1,1) = [];
ac_ini(1,1) = 0;

for i = 1:T
    ac_ini(i+1,1) = inicio(i+1,1)+ac_ini(i,1);
end

%Gráfica del acumulado total

```

```

%% Gráficas

    %Gráfica del acumulado

t = linspace(0,T+1,T+1); % +1 por día cero de inicio

figure(1)
hold on
plot(t,ac_ini);
title('Beneficio acumulado al año');
xlabel('Días del periodo [d]');
ylabel('Euros');
hold off
axis([0 366 0 14e6]);

    %Gráfica de Potencias de invierno

figure(2)
hold on
plot(linspace(1,72,72), [PTfinal(:,5);PTfinal(:,6);PTfinal(:,7)]);
plot(linspace(1,72,72), [pot_solar_ordenado(:,5);pot_solar_ordenado(:,6);pot_solar_ordenado(:,7)]);
plot(linspace(1,72,72), [Eafinal(:,5); Eafinal(:,6); Eafinal(:,7)]);
plot(linspace(1,72,72), [precios_ordenado(:,5);precios_ordenado(:,6);precios_ordenado(:,7)]);
title('Beneficio acumulado al año');
xlabel('Días del periodo [d]');
ylabel('Euros');
hold off
axis([0 72 0 440]);
title('Análisis de tres días de invierno');
xlabel('Horas del periodo [h]');
ylabel('Potencia [MW]');
legend('Potencia de salida','Potencia solar','Energía almacenada','Precio [Eur/MWh]');
hold off

    %Gráfica de Potencias de verano

figure(3)
hold on
plot(linspace(1,72,72), [PTfinal(:,191);PTfinal(:,192);PTfinal(:,193)]);
plot(linspace(1,72,72), [pot_solar_ordenado(:,191);pot_solar_ordenado(:,192);pot_solar_ordenado(:,193)]);
plot(linspace(1,72,72), [Eafinal(:,191); Eafinal(:,192); Eafinal(:,193)]);
plot(linspace(1,72,72), [precios_ordenado(:,191);precios_ordenado(:,192);precios_ordenado(:,193)]);
title('Beneficio acumulado al año');
xlabel('Días del periodo [d]');
ylabel('Euros');
hold off
axis([0 72 0 800]);
title('Análisis de tres días de verano');
xlabel('Horas del periodo [h]');
ylabel('Potencia [MW]');
legend('Potencia de salida','Potencia solar','Energía almacenada','Precio [Eur/MWh]');
hold off

%% Quitar Warnings

warning('off','all');

%% Continuacion

% pot_sol_dia = zeros(24,1);

% for dias = 1:1
%
%     pot_sol_dia = pot_solar_ordenado(1:24,dias);
%     precios_dia = precios_ordenado(1:24,dias);
%
%     % Ecuación 1

```



```
%
rendimiento = 0.35;
ec1_pt = eye(24)/rendimiento;
% %
%   ec1_deltap = zeros(24);
%
%
%
%
% %
%   % Ecuación 3
%   ec3_pt = eye(24);
%
%
%   for j = 2:24
%       ec3_pt(j,j-1) = -1;
%   end
%
%   ec3_deltap = eye(24);
%
% %
%   % MATRIZ
%   MAT = [ec1_pt ec1_deltap;ec3_pt ec3_deltap];
%
%   MAT = [ec1_pt];
%
% %
%   % Términos independientes
%   ti = [pot_sol_dia - Pw; zeros(24,1)];
%
%   ti = [pot_sol_dia - Pwarm];
%
% %
%   RESULT = inv(MAT)*ti;
%
% %
%   % RESULTADOS
%   RESULTADOS(1:24,dias) = RESULT (1:24,1);
%   PT(1:24,dias) = RESULT(1:24,1);
%   DELTAP(1:24,dias) = RESULT(25:48,1);
%
%
%
% A = [ ];
% b = [ ];
% Aeq = MAT;
% beq = ti;
% lb = zeros(1,24);
% ub = 200*ones(1,24);
%
% f = precios_dia';
%
% x = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
%
% end
%
% %% Función optimizada
%
%
%
% % precio = randi([0,200],24,1); % [?]
% % Kg = 0.3;
% % Pgrid = 0;
%
% %
% % DELTAP_abs = 0;
%
% %
% % f = precio.*PT - Kg*DELTAP_abs - precio.*Pgrid;
%
%
%
% % A = zeros(T,1);
% % b = zeros(T,1);
% % Aeq = MAT;
% % Beq = ti;
% % lb = [0, 0];
% % ub = [10000,10000];
% % linprog(f, A, b, Aeq, Beq, lb, ub);
```

### Programa\_Calculo\_Sin\_Optimizacion.m

```
%%TFGALVAROPEÑALVERMARTÍN code for ALVAROPEÑALVERMARTÍN in
%%'Programa_Calculo_v01.m' and 'Programa_Calculo_Sin_Optimizacion.m

%% Reset de variables

clc; clear all; format bank;
```

```

%% Inicialización de Términos Independientes

T = 365;

% Pot.solar
pot_solar = xlsread('SOLAR.xlsx',1,'B2:B9000');
pot_solar_ordenado = reshape(pot_solar,[24,T]);

% Precios Diarios de la Energía
precios = xlsread('Precios Mercado.xlsx',1,'E3:E9000');
precios_ordenado = reshape(precios,[24,T]);

% Cálculo de la Ewarm para cada uno de los días

Ewarm = zeros(1,365);
max_pot_solar = max(sum(pot_solar_ordenado)); %máximo de la suma de las potencias (energías)
solares de todo el día

for i = 1:365

    Ewarm_calculo =
    sum(pot_solar_ordenado(:,i))/((((sum(pot_solar_ordenado(:,i))/max_pot_solar)+1)^13)+0.0015);
    Ewarm(1,i) = Ewarm_calculo;

end

% Potencia de Arranque Pstartup

Estartup = 60;

%% Sacar Valores

final = ones(1,2);

% Resultados para todo el año
for dias = 1:T    % Bucle para coger todos los días

    Psolar = pot_solar_ordenado (1:24,dias); % Datos de la potencia solar en un día.

    Precios = precios_ordenado (1:24,dias); % Precios Diarios en un día.

    Ewarmdia = Ewarm (1,dias); % Energía de Calentamiento de un día.

% Ecuación para Pwarm y Pstartup
    contador = 0;
    contador2 = 0;
    Pwarm = zeros(24,1);
    Pstartup = zeros(24,1);

    for j = 1:24
        if contador < Ewarmdia
            contador = contador + Psolar(j,1);
            Pwarm(j,1) = Psolar(j,1);
            if contador > Ewarmdia
                Pwarm(j,1) = Psolar(j,1) - contador + Ewarmdia;
            end
        end
        if contador > Ewarmdia && contador2 < Estartup
            contador2 = contador2 + Psolar(j,1);
            Pstartup(j,1) = Psolar(j,1)-Pwarm(j,1);
            if contador2 > Estartup
                Pstartup(j,1) = Psolar(j,1) -contador2 + Estartup;
            end
        end
    end

end

% Ecuaciones de la Linealización

%Ecuación de balance de potencias con Pt , Paplus, Paminus, Pspill, Ea

%Ecuación Pt

Rendimiento = 0.35;

Ec1_Pt = eye(24)/Rendimiento;

```

```

%Ecuación Pa+
Rendimiento_Almacenamiento = 0.9;
Ec1_Papulus = eye(24)*(-Rendimiento_Almacenamiento);

%Ecuación Pa-
Ec1_Paminus = eye(24);

%Ecuación Pspill
Ec1_Pspill = eye(24);

%Ecuación Ea
Ec1_Ea = zeros(24);

%Ecuación de Almacenamiento con Pt , Papulus, Paminus, Pspill, Ea

%Ecuación 2 Pt
Ec2_Pt = zeros(24);

%Ecuación 2 Pa+
Rendimiento_Almacenamiento = 0.9;
Ec2_Papulus = eye(24)/(Rendimiento_Almacenamiento);

%Ecuación 2 Pa-
Rendimiento_Almacenamiento = 0.9;
Ec2_Paminus = eye(24)*(-Rendimiento_Almacenamiento);

%Ecuación 2 Pspill
Ec2_Pspill = zeros(24);

%Ecuación 2 Ea
Ec2_Ea = eye(24);

for j = 2:24
    Ec2_Ea(j,j-1) = -1;
end

% Matriz de Resultados
Matriz_A = [Ec1_Pt Ec1_Pspill;
            Ec2_Pt Ec2_Pspill];

%Términos Independientes
TI = [Psolar - Pwarm - Pstartup; zeros(24,1)];

% Optimización de Potencia

% El objetivo es maximizar la función de SUMATORIO[Precio(j)*Pt(j)-Precio(j)*Pgrid(j)]

A = [ ];
b = [ ];
Aeq = Matriz_A;
beq = TI;
lb = zeros(1,48);
ub = [100*ones(1,24) , inf(1,24)];

f = [Precios' zeros(1,24)];

```

```

x = linprog(-f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);

x_ordenado = reshape(x,[24,2]);

final = [final; x_ordenado]; %Matriz de resultados final

warning('off','all');

end % Final del buque de los dias

final(1,:)=[]; %Matriz de resultados final sin la fila de ceros
PTfinal = reshape(final(:,1),[24,T]); %Potencia total final
Pspillfinal = reshape(final(:,2),[24,T]); %Energía almacenada final

acumulado = final(:,1).*precios;
inicio = 0;

for i = 0:T-1
    acumulado_dia = sum(acumulado(1+24*i:24*(i+1),1));
    inicio = [inicio;acumulado_dia];
end

%inicio(1,1) = [];
ac_ini(1,1) = 0;

for i = 1:T
    ac_ini(i+1,1) = inicio(i+1,1)+ac_ini(i,1);
end

%Gráfica del acumulado total
%% Gráficas

%Gráfica del acumulado

t = linspace(0,T+1,T+1); % +1 por día cero de inicio

figure(1)
hold on
plot(t,ac_ini);
title('Beneficio acumulado al año');
xlabel('Días del periodo [d]');
ylabel('Euros');
hold off
axis([0 366 0 14e6]);

%Gráfica de Potencias De Invierno
figure(2)
hold on
plot(linspace(1,72,72),[PTfinal(:,5);PTfinal(:,6);PTfinal(:,7)]);
plot(linspace(1,72,72),
[pot_solar_ordenado(:,5);pot_solar_ordenado(:,6);pot_solar_ordenado(:,7)]);
%plot(linspace(1,72,72), [EAfinal(:,5); EAfinal(:,6); EAfinal(:,7)]);
plot(linspace(1,72,72), [precios_ordenado(:,5);precios_ordenado(:,6);precios_ordenado(:,7)]);
title('Beneficio acumulado al año');
xlabel('Días del periodo [d]');
ylabel('Euros');
hold off
axis([0 72 0 440]);
title('Análisis de tres días de invierno');
xlabel('Horas del periodo [h]');
ylabel('Potencia [MW]');
legend('Potencia de salida','Potencia solar','Precio [Eur/MWh]');
hold off

%Gráfica de Potencias De Verano
figure(3)
hold on
plot(linspace(1,72,72),[PTfinal(:,191);PTfinal(:,192);PTfinal(:,193)]);
plot(linspace(1,72,72),
[pot_solar_ordenado(:,191);pot_solar_ordenado(:,192);pot_solar_ordenado(:,193)]);
%plot(linspace(1,72,72), [EAfinal(:,5); EAfinal(:,6); EAfinal(:,7)]);
plot(linspace(1,72,72),
[precios_ordenado(:,191);precios_ordenado(:,192);precios_ordenado(:,193)]);
title('Beneficio acumulado al año');
xlabel('Días del periodo [d]');
ylabel('Euros');

```

```

hold off
axis([0 72 0 800]);
title('Análisis de tres días de verano');
xlabel('Horas del periodo [h]');
ylabel('Potencia [MW]');
legend('Potencia de salida','Potencia solar','Precio [Eur/MWh]');
hold off

%% Quitar Warnings

warning('off','all');

%% Continuacion

% pot_sol_dia = zeros(24,1);

% for dias = 1:1
%
%     pot_sol_dia = pot_solar_ordenado(1:24,dias);
%     precios_dia = precios_ordenado(1:24,dias);
%
%     % Ecuación 1
%     rendimiento = 0.35;
%     ec1_pt = eye(24)/rendimiento;
%     %     ec1_deltap = zeros(24);
%
%
%
%     % Ecuación 3
%     %     ec3_pt = eye(24);
%     %
%     for j = 2:24
%         %     ec3_pt(j,j-1) = -1;
%     end
%     %
%     %     ec3_deltap = eye(24);
%
%
%     % MATRIZ
%     %     MAT = [ec1_pt ec1_deltap;ec3_pt ec3_deltap];
%
%     MAT = [ec1_pt];
%
%     % Términos independientes
%     %     ti = [pot_sol_dia - Pw; zeros(24,1)];
%
%     ti = [pot_sol_dia - Pwarm];
%
%     RESULT = inv(MAT)*ti;
%
%
%     % RESULTADOS
%     %     RESULTADOS(1:24,dias) = RESULT (1:24,1);
%     %     PT(1:24,dias) = RESULT(1:24,1);
%     %     DELTAP(1:24,dias) = RESULT(25:48,1);
%
%
%
% A = [ ];
% b = [ ];
% Aeq = MAT;
% beq = ti;
% lb = zeros(1,24);
% ub = 200*ones(1,24);
%
% f = precios_dia';
%
% x = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
%
% end
%
%% Función optimizada
%
%
```

```
%  
% precio = randi([0,200],24,1); % [?]  
% Kg = 0.3;  
% Pgrid = 0;  
%  
% DELTAP_abs = 0;  
%  
% f = precio.*PT - Kg*DELTAP_abs - precio.*Pgrid;  
%  
%  
% A = zeros(T,1);  
% b = zeros(T,1);  
% Aeq = MAT;  
% Beq = ti;  
% lb = [0, 0];  
% ub = [10000,10000];  
% linprog(f, A, b, Aeq, Beq, lb, ub);
```

# BIBLIOGRAFÍA

[1] Endesa Educa (página web)

<[http://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/el-sector-electrico/xix.-el-mercado-de-la-electricidad](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/el-sector-electrico/xix.-el-mercado-de-la-electricidad)>

[2] Energía y Sociedad. Manual de la energía

<<http://www.energiaysociedad.es/manenergia/6-5-mecanismos-de-ajuste-de-demanda-y-produccion>>

[3] Energía y Sociedad. Formación de Precios en el mercado eléctrico.

<<http://www.energiaysociedad.es/manenergia/6-1-formacion-de-precios-en-el-mercado-mayorista-diario-de-electricidad/>>

[4] Salva Energía. Mercado Eléctrico español.

<<http://www.salvaenergy.com/mercado-electrico-espanol-breve-descripcion/>>

[5] Red Eléctrica de España. El operador del sistema. Centro de control de la red.

<<http://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico/centro-de-control-electrico>>

[6] Red Eléctrica de España. El operador del sistema.

<<http://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico>>

[7] Red Eléctrica de España. CECOEL

<<http://www.ree.es/es/videos/tecnico/cecoel>>



- [8] OMIE. El mercado diario e intradiario.  
<<http://www.omel.es/inicio/mercados-y-productos/mercado-electricidad/nuestros-mercados-de-electricidad/mercado-diario>>
- [9] Wikipedia. Sistema de suministro eléctrico  
<[https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_suministro\\_el%C3%A9ctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_suministro_el%C3%A9ctrico)>
- [10] SKV. Quién es quién en el sistema eléctrico español.  
<<http://blog.gesternova.com/quien-es-quien-en-el-sistema-electrico-espanol/>>
- [11] Apuntes de la asignatura Regulación Eléctrica – Julio Usaola.
- [12] Red Eléctrica de España. El operador del sistema eléctrico.  
<<http://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico#>>
- [13] Twenergy. La generación de energía eléctrica.  
<<https://twenergy.com/a/el-largo-viaje-de-la-electricidad-211>>
- [14] Gas Natural Fenosa. Ciclos combinados de gas.  
<<https://www.gasnaturalfenosa.es/es/conocenos/compromiso+y+sostenibilidad/cambio+climatico/energias+responsables/1297101993224/ciclos+combinados.html>>
- [15] Global Electricity. Ciclo combinado  
<<https://globalelectricity.wordpress.com/2013/10/17/central-de-gasificacion-integrada-con-ciclo-combinado/>>
- [16] ERES. Consultores internacionales. Centrales térmicas de ciclo combinado  
<[http://ceresconsultoresinternacionales.com/?page\\_id=53](http://ceresconsultoresinternacionales.com/?page_id=53)>
- [17] Artículo en la web sobre el ciclo de vapor Rankine.  
<<http://utptermodinamica2.blogspot.com.es/2013/11/ciclo-rankine-simple-sobrecalentamiento.html>>
- [18] Wikipedia. Explicativo sobre el ciclo Brayton.  
<[https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo\\_Brayton](https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_Brayton)>
- [19] SlideShare. Artículo de Lianne Colpas Barraza, Edwin Peralta Hernández y Francisco Sorzano Jiménez, sobre ciclos de potencia combinados de gas y vapor.  
<<https://es.slideshare.net/eddwike/ciclos-de-potencia-combinados-de-gas-y-vapor>>
- [20] Naturelek. Artículo sobre producción eléctrica peninsular en 2016  
<<http://naturelek.com/411-la-produccion-electrica-peninsular-2016-procedio-renovables/>>

- [21] E-educativa. Explicación sobre centrales térmicas convencionales.  
<[http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2000/2101/html/2\\_centrales\\_trmicas\\_convencionales.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2000/2101/html/2_centrales_trmicas_convencionales.html)>
- [22] Mercedes de Vega Blázquez. Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid. Asignatura de Centrales Eléctricas I, 2014. Centrales Térmicas, Centrales Nucleares, Centrales de ciclo combinado, Centrales Hidráulicas.
- [23] Foro de la Industria Nuclear Española.  
<<http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/121361-cuales-son-los-distintos-componentes-de-una-central-nuclear>>
- [24] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital  
<<http://www.minetad.gob.es/energia/nuclear/Centrales/Espana/Paginas/CentralesEspana.aspx>>
- [25] KALOGIROU, Soteris. *Solar Energy Engineering*. Elsevier, 2009.
- [26] Info Libre. Artículo sobre las energías renovables.  
<[https://www.infolibre.es/noticias/economia/2017/07/12/las\\_renovables\\_representan\\_mas\\_del\\_potencia\\_instalada\\_cierre\\_2016\\_67492\\_1011.html](https://www.infolibre.es/noticias/economia/2017/07/12/las_renovables_representan_mas_del_potencia_instalada_cierre_2016_67492_1011.html)>
- [27] ESEficiencia. Portal de eficiencia y Servicios Energéticos. La potencia fotovoltaica.  
<<https://www.eseficiencia.es/2016/09/14/la-potencia-fotovoltaica-mundial-alcanza-cifras-historicas-en-2015>>
- [28] EnergiaDobleCero. La energía eólica.  
<<http://energiadoblezero.com/energias-renovables/energia-eolica/componentes-de-un-aerogenerador>>
- [29] LBA. Tipos de aerogeneradores verticales.  
<<http://www.lbaindustrial.com.mx/tipos-aerogeneradores-darrieus/>>
- [30] SMI Energías Renovables.  
<<https://smienergias.wordpress.com/category/energia-eolica/offshore-vs-onshore/>>
- [31] Aula Tecnología. Presentación sobre tecnología de origen marino.  
<[http://www.aulatecnologia.com/BACHILLERATO/1\\_bg/APUNTES/ALTERNATIVAS/maremotriz/origenmarino.htm](http://www.aulatecnologia.com/BACHILLERATO/1_bg/APUNTES/ALTERNATIVAS/maremotriz/origenmarino.htm)>
- [32] Eco Medio Ambiente. Blog sobre el medio ambiente y reciclaje.  
<<http://ecomedioambiente.com/energias-renovables/energia-undimotriz/>>

- [33] El rincón tecnológico de Sebas. Tipos de recursos naturales.  
<[http://elrincontecnologicodesebas.blogspot.com.es/p/blog-page\\_5.html](http://elrincontecnologicodesebas.blogspot.com.es/p/blog-page_5.html)>
- [34] Red Eléctrica de España. Gráficas de demanda en el día 22 de septiembre de 2017.  
<<https://demanda.ree.es/demanda.html>>
- [35] Unet. Explicativo de la tecnología hidráulica.  
<<http://www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-118.htm>>
- [36] SlideShare. Funcionamiento de la energía hidroeléctrica, de Yuliana Monsalve Gil, Maria Fernanda Ochoa Cañas, Luis Felipe Gutiérrez Vera y Tatiana Usuga Raigoza.  
<<https://es.slideshare.net/agmejia1/funcionamiento-de-la-energia-hidroelectrica>>
- [37] Tecno Blog San Martín. Placas fotovoltaicas.  
<<https://tecnoblogsanmartin.wordpress.com/category/tecnologia-3%C2%BA-e-s-o/unidad-5-energias-renovables/5-1-energia-solar/>>
- [38] Las redes de transporte y distribución. Julio Usaola. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid. Asignatura de Regulación Eléctrica, 2016
- [39] Electricidad. Transporte de la electricidad. Apoyos de la red.  
<<https://electricidad-viatger.blogspot.com.es/2010/05/postes-de-alta-y-baja-tension-1.html>>
- [40] WSC Electricistas Matriculados. Cable subterráneo. Modo de colocación  
<<http://tecnicoelectricistawsc.blogspot.com.es/2009/06/cable-subterraneo-modo-de-colocacion.html>>
- [41] Sitio Solar. Portal de energías renovables. Historia de la energía solar térmica.  
<<http://www.sitiosolar.com/historia-de-la-energia-solar-termica-parte-i/>>
- [42] Tecnología Obsoleta. Los ingenios solares de Mouchot y Pifre.  
<<http://www.alpoma.net/tecob/?p=9996>>
- [43] SlideShare. Historia de la energía solar.  
<<https://es.slideshare.net/geopaloma/historia-de-la-energa-solar-termica-i>>
- [44] '*Operation of concentrating solar power plants with storage in spot electricity markets*'. Julio Usaola. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid

- [45] Universidad de Jaén. Artículo sobre el movimiento aparente del sol.  
<<http://fc.uni.edu.pe/mhorn/IF%20442%202011/IF%20442%20clase%203%20Movimiento%20del%20sol.htm>>
- [46] Conceptos Físicos Generales.  
<[http://ayudahispano-3000.blogspot.com.es/2014/12/conceptos-fisicos\\_6.html](http://ayudahispano-3000.blogspot.com.es/2014/12/conceptos-fisicos_6.html)>
- [47] Ministerio de Educación. Instituto de Tecnologías Educativas. Efecto del ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la irradiancia.  
<[https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion02/11\\_efecto\\_del\\_angulo\\_de\\_incidencia\\_de\\_los\\_rayos\\_solares\\_sobre\\_la\\_irradiancia.html](https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion02/11_efecto_del_angulo_de_incidencia_de_los_rayos_solares_sobre_la_irradiancia.html)>
- [48] Scalofrios. Energía Solar Térmica.  
<<http://www.scalofrios.es/Calor/solar.htm>>
- [49] Opex Energy. Funcionamiento de una placa fotovoltaica.  
<[http://opex-energy.com/en/fotovoltaica/funcionamiento\\_fotovoltaica.html](http://opex-energy.com/en/fotovoltaica/funcionamiento_fotovoltaica.html)>
- [50] SENER. Alianza III – SENER, Ingeniería y Sistemas. Centrales Termosolares. Octubre 2005, México DF.  
<<http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/3716/3/borjazarraga.pdf>>
- [51] EUITI de Éibar. Tecnologías Solares Termoeléctricas.  
<<http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/termoelectrica/revision/revision.html>>
- [52] Rumbo Minero. Minería & Energía. Planta solar en Chile  
<<http://www.rumbominero.com/noticias/internacionales/chile-acciona-inicia-operacion-de-mayor-campo-solar-de-america-latina/>>
- [53] Abengoa Solar. Energía solar para un mundo sostenible  
<<http://www.abengoasolar.com/web/es/multimedia/>>
- [54] RENOVETEC. [Libro] Fragmentos de Sistema HTF en centrales termosolares. Fragmentos de Fluidos caloportadores.]
- [55] Opex Energy. Tipos de centrales Termosolares.  
<[http://opex-energy.com/termosolares/centrales\\_termosolares.html](http://opex-energy.com/termosolares/centrales_termosolares.html)>
- [56] ABC. Artículo "La Torre que dominó al. Sol" José Luis Losa. Sevilla. 10/10/2011  
<<http://www.abc.es/20111010/sociedad/abcp-torre-domino-20111010.html>>

[57] Energía Solar. Energía Solar térmica de alta temperatura.

<<https://solar-energia.net/energia-solar-termica/alta-temperatura>>

[58] EUITI de Éibar. Tecnologías Solares Termoeléctricas.

<<http://www.sc.ehu.es/sbweb/energiasrenovables/temas/termoelectrica/revision/revision.html>>

[59] Red Eléctrica de España. ESIOS Sistema de Información del operador del sistema.  
Precio Mercado Spot Diario

<[https://www.esios.ree.es/es/analisis/600?vis=1&start\\_date=25-07-2017T00%3A00&end\\_date=25-07-2017T23%3A00&compare\\_start\\_date=24-07-2017T00%3A00&groupby=hour&compare\\_indicators=1013,705](https://www.esios.ree.es/es/analisis/600?vis=1&start_date=25-07-2017T00%3A00&end_date=25-07-2017T23%3A00&compare_start_date=24-07-2017T00%3A00&groupby=hour&compare_indicators=1013,705)>

[60] Ministerio de Energía, Turismo y agenda digital. Artículo en Pdf.

<[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_PER\\_2011-2020\\_def\\_93c624ab.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_PER_2011-2020_def_93c624ab.pdf)>

[62] '*Stochastic production of CSP solar plants for generation planning*'. Julio Usaola.  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid